

Grado en Ingeniería Mecánica  
2018 - 2019

*TRABAJO FIN DE GRADO*

# ESTADO DEL ARTE DE LOS ACUMULADORES CINÉTICOS DE ENERGÍA

Autor: José Ignacio Fontán Álvarez-  
Garcillán

Tutor: Eduardo Corral Abad

Leganés, octubre 2018



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

Título: ESTADO DEL ARTE DE LOS ACUMULADORES  
CINÉTICOS DE ENERGÍA.

Autor: José Ignacio Fontán Álvarez-Garcillán

Tutor: Eduardo Corral Abad

## EL TRIBUNAL

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Fin de Máster el día \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2018 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Dedicado a mis padres, por hacer posible y apoyar mi formación académica;  
a mi tutor, Eduardo, por guiarme y estar siempre dispuesto a ayudarme;  
a Cecilia, por estar a mi lado en los buenos y en los malos momentos;  
a Jorge, Gabriel y Álvaro, por compartir esta etapa conmigo.

# Resumen

Actualmente, existe mucha diversidad de métodos de generación y almacenamiento de energía, pero no todos ellos cumplen con las necesidades ambientales de la sociedad de hoy. La evolución de las formas de generación de energía renovable trae consigo la evolución de los medios ambientalmente respetuosos de almacenamiento de energía, entre los cuales se encuentran los acumuladores cinéticos. Como su propio nombre indica, los acumuladores cinéticos almacenan energía en su forma cinética, es decir, mediante el movimiento de una masa.

Además de almacenar energía sin producir daños en el medio ambiente, los acumuladores cinéticos aportan una serie de ventajas como la regulación de la potencia, versatilidad a la hora de combinarlos con una gran variedad de sistemas de generación de energía presentes en el panorama tecnológico actual y un amplio abanico de posibilidades en cuanto a tamaño y capacidad de almacenamiento.

Los últimos avances han permitido que los acumuladores cinéticos sustituyan o se combinen con baterías y otros medios de acumulación de energía, resultando en sistemas más favorables para el medio ambiente y más eficientes.

En este documento se realiza una revisión de los acumuladores cinéticos, así como de los sistemas que recuperan la energía cinética que normalmente se desaprovecha. También se expone el marco histórico de la tecnología y una comparativa con los sistemas de acumulación de energía relacionados y más comunes en el presente.

Palabras clave: conservación de la energía, conversión de la energía, control de la energía, regeneración de la energía, acumulador cinético, volante de inercia, batería inercial.

# Abstract

Currently, there is a great diversity of energy generation and storage methods, but not all of them meet the environmental needs of today's society. The evolution of the multiple ways of renewable energy generation brings along the evolution of respectful environmental means of energy storage, among which are the kinetic accumulators. As their own name reveals, kinetic accumulators store energy in their kinetic form, in other words, by the movement of a mass.

In addition to storing energy without causing damage to the environment, kinetic accumulators provide other additional advantages such as power regulation, versatility when combined with a variety of power generation systems present in the current technological landscape and a wide range of possibilities in terms of size and storage capacity.

The latest advances have allowed kinetic accumulators to replace or combine with other means of energy accumulation and generation, resulting in systems more favorable for the environment and more efficient.

In this document a revision of the kinetic accumulators is performed, as well as of the systems that recover the kinetic energy that is normally wasted. It also contains a historical framework of the mentioned technology and a comparison with the most common energy accumulation related systems in the present.

Key words: energy conservation, energy conversion, energy control, energy regeneration, kinetic accumulator, flywheels, inertial battery.

# ÍNDICE DEL DOCUMENTO

1	INTRODUCCIÓN	8
1.1	Ámbito y motivación	8
1.2	Objetivos	10
1.3	Estructura del documento	10
2	HISTORIA DE LOS ACUMULADORES CINÉTICOS	11
2.1	Marco histórico y evolución de la tecnología	11
2.2	Los acumuladores cinéticos en la actualidad	12
3	COMPLEMENTOS TEÓRICOS	13
3.1	Teoría básica sobre los acumuladores cinéticos de energía	13
3.1.1	Definición de acumulador cinético y aplicaciones	13
3.1.2	Clasificación elemental de los acumuladores cinéticos	14
3.2	Descripción técnica de los sistemas acumuladores cinéticos mecánicos	15
3.2.1	Funciones de los componentes del sistema	15
3.2.2	Aplicaciones de los acumuladores cinéticos mecánicos	26
3.3	Descripción técnica de los sistemas conversores de energía cinética	39
3.3.1	Funciones de los componentes del sistema	39
3.3.2	Aplicaciones de los sistemas conversores de energía cinética	41
4	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA TECNOLOGÍA ACTUAL	50
4.1	Comparativa global cualitativa	50
4.2	Comparativa global cuantitativa	H2
5	TENDENCIAS Y FUTURO DE LOS ACUMULADORES CINÉTICOS	51
6	CONCLUSIONES	52
7	PRESUPUESTO	52
8	REFERENCIAS	54

# ÍNDICE DE IMÁGENES

<i>Imagen 1: Baterías más comunes en la actualidad.</i>	9
<i>Imagen 2: Esquema simple de un generador fotovoltaico con acumulador cinético</i>	14
<i>Imagen 3: Esquema generalizado de un freno regenerativo.</i>	15
<i>Imagen 4: Esquema de un acumulador cinético por volante de inercia con transmisión mecánica.</i>	16
<i>Imagen 5: Coeficientes de forma K en función de las geometrías más utilizadas</i>	19
<i>Imagen 6: Volante de inercia con M/G acoplado por correa de transmisión.</i>	22
<i>Imagen 7: Diseño de una CVT común.</i>	23
<i>Imagen 8: Vista inferior de uno de los volantes de inercia del JET.</i>	27
<i>Imagen 9: Configuración en paralelo para híbridos 1.</i>	30
<i>Imagen 10: Configuración en paralelo para híbridos 2.</i>	30
<i>Imagen 11: Configuración en paralelo para híbridos 3.</i>	31
<i>Imagen 12: Configuración en serie para híbridos.</i>	31
<i>Imagen 13: Configuración en paralelo para eléctricos 1.</i>	32
<i>Imagen 14: Configuración en paralelo para eléctricos 2.</i>	32
<i>Imagen 15: Configuración en paralelo para eléctricos 3.</i>	33
<i>Imagen 16: Esquema del mecanismo del acumulador cinético por torsión.</i>	33
<i>Imagen 17: Diagrama de fuerzas sobre el sistema rueda-muelle de torsión.</i>	34
<i>Imagen 18: Motor/generador brushless.</i>	40
<i>Imagen 19: Amortiguador regenerativo por generador lineal 1.</i>	45
<i>Imagen 20: Amortiguador regenerativo por generador lineal 2.</i>	45
<i>Imagen 21: Amortiguador regenerativo por generador lineal 3.</i>	46
<i>Imagen 22: Generador lineal conversor de energía cinética hidrodinámica.</i>	47
<i>Imagen 23: Amortiguador regenerativo por generador rotativo piñón-cremallera</i>	48
<i>Imagen 24: Funcionamiento de la transmisión piñón-cremallera del amortiguador regenerativo por generador rotativo.</i>	48
<i>Imagen 25: Mecanismo conversor de traslación-rotación alternativo para suspensión regenerativa por generador rotativo.</i>	49

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Momentos de inercia de geometrías comunes de volantes de inercia</i>	17
<i>Tabla 2: Propiedades de los principales materiales de los rotores.</i>	21
<i>Tabla 3: Comparación cualitativa de los principales sistemas de acumulación de energía.</i>	H1
<i>Tabla 4: Comparación cuantitativa de algunos de los principales sistemas de acumulación de energía actuales.</i>	H2

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1: Expresión de la energía cinética de una masa en rotación.</i>	17
<i>Ecuación 2: Expresión general para el cálculo del momento de inercia.</i>	17
<i>Ecuación 3: Descomposición del diferencial de masa.</i>	17
<i>Ecuación 4: Ecuación 4: Expresión de la tensión máxima en un cilindro macizo uniforme.</i>	18
<i>Ecuación 5: Expresión de la tensión circunferencial máxima en un cilindro hueco de pared delgada.</i>	18
<i>Ecuación 6: Primera expresión de la energía cinética específica.</i>	19
<i>Ecuación 7: Segunda expresión de la energía cinética específica.</i>	20
<i>Ecuación 8: Expresión de la densidad de energía cinética.</i>	20
<i>Ecuación 9: Momento máximo que experimenta el muelle de torsión.</i>	34
<i>Ecuación 10: Índice de torsión del muelle de torsión.</i>	35
<i>Ecuación 11: Factor K del muelle de torsión.</i>	35
<i>Ecuación 12: Expresión de la resistencia máxima a la torsión del muelle.</i>	35
<i>Ecuación 14: Expresión del ángulo de torsión máximo.</i>	35
<i>Ecuación 15: Expresión del ángulo límite de torsión.</i>	35
<i>Ecuación 16: Flujo de campo magnético a través de una superficie S.</i>	36
<i>Ecuación 17: Fuerza electro-motriz inducida.</i>	40



# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Ámbito y motivación

En respuesta a la actual demanda de formas de energía no perjudiciales para el medio ambiente, la comunidad científica invierte cada vez más capital y recursos en el desarrollo de nuevos sistemas de generación de energía y en la evolución de sistemas ya desarrollados anteriormente, con el fin de obtener un mayor rendimiento de los mismos.

Una de las formas de energía más antiguas conocida por la humanidad es la producida por una masa en movimiento, denominada energía cinética. Ésta fuente de energía a simple vista tan elemental, ha cobrado gran importancia en las últimas décadas debido a la gran necesidad de la sociedad actual, tanto de almacenar energía como de hallar formas de generación de *energía limpia*, no contaminante.

Por un lado, la necesidad de almacenar energía tiene su origen hace miles de años, pero adquiere una mayor importancia cuando se empieza a controlar y a utilizar la electricidad con fines comerciales y tecnológicos a finales del siglo XIX. En la actualidad, la gran mayoría de los sistemas y dispositivos que utilizamos dependen de un suministro eléctrico, el cual es aportado, bien por la compañía eléctrica que abastece las tomas de corriente a las que conectamos nuestros dispositivos, o bien mediante el uso de baterías recargables. Pero la gran evolución tecnológica que estamos experimentando necesita una evolución paralela de los métodos de suministro de energía, que pueda adaptarse a la gran demanda. Ésta es una de las razones por las que se están desarrollando nuevas formas de acumulación de energía, como son los acumuladores cinéticos, con el fin de disminuir la dependencia del constante suministro eléctrico que requieren nuestros dispositivos y las baterías que los alimentan.

Por otro lado, la alarma ambiental que nos advierte del aumento exponencial del deterioro de nuestro planeta llegó hace ya algunas décadas a oídos de la industria energética. Cada año son más los esfuerzos por reducir la utilización de combustibles fósiles y sus derivados, que tanto daño están infligiendo en la atmósfera y en la superficie terrestre. Éste hecho se ve reflejado en la presente transición a sistemas de generación de energía alternativos que nuestra sociedad está viviendo. La electricidad juega un papel clave en dicha transición al ser la forma de *energía limpia* más accesible y versátil.

Sin embargo, un gran aumento de la demanda de energía eléctrica va de la mano con la necesidad de almacenarla. Las baterías recargables que tan acostumbrados estamos a utilizar, han demostrado ser eficientes, pero no lo suficiente como para soportar la enorme demanda que requiere la transición a la electricidad por sí mismas. Además, tanto las pilas alcalinas y recargables como las baterías de litio (*Imagen 1*), requieren un gran sacrificio ambiental y social en el proceso de obtención de sus componentes, su reciclaje supone un procesado costoso y un elaborado plan de disposición de los residuos y en caso de no ser recicladas, pueden producir graves daños ambientales.



*Imagen 1: Batería de litio para coche (izquierda), pilas alcalinas comunes (arriba a la derecha) y batería de litio para teléfono móvil (abajo a la derecha). Fuente: Google*

Por tanto, por razones ambientales y de abastecimiento, la industria energética se ve motivada a emprender la búsqueda de alternativas en cuanto a las formas de acumulación de energía utilizadas hasta el momento. Una de estas alternativas reside en el aprovechamiento de la energía cinética, ya sea producida por un movimiento de traslación o de rotación. El término “aprovechar” puede interpretarse de dos formas en este contexto:

- La primera, la capacidad para convertir la energía cinética de una masa en movimiento producida por un aporte de trabajo necesario al sistema, directamente en electricidad transmitiendo dicho movimiento a un generador eléctrico, sin necesidad de un aporte extra de trabajo;
- La segunda, transmitir la energía cinética producida por un aporte de trabajo necesario al sistema a un conjunto mecánico capaz de almacenar dicha energía cinética durante el mayor tiempo posible para que pueda ser utilizada posteriormente por el sistema motor.

Aunque los sistemas descritos por la primera interpretación no almacenan energía cinética sino que la convierten en energía eléctrica directamente, se consideran también como acumuladores cinéticos siempre y cuando no se aporte un trabajo adicional para alimentar el generador eléctrico, sino que se recoja la energía residual que se disipa, normalmente en forma de calor, tras el aporte de trabajo necesario. La diferencia entre estos dos sistemas se explica de forma detallada en el [apartado 3.1.2](#) de este documento.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal del presente documento es la redacción de un estado del arte sobre los acumuladores cinéticos, que comprende:

- La recopilación y síntesis de la información disponible sobre las distintas formas de acumuladores cinéticos que se han creado y utilizado a lo largo de la historia.
- La investigación y consiguiente desarrollo en profundidad de los sistemas más utilizados en la actualidad para su correcta comprensión e interpretación.
- La recopilación de la información disponible sobre las últimas tendencias y avances en el diseño de los acumuladores cinéticos que se encuentran en fase de desarrollo o se pretenden diseñar en un futuro próximo.

Con la combinación de estos tres objetivos se pretende crear un documento que pueda servir como una referencia clara y concisa para presentes y futuros investigadores en la materia y difundir los conocimientos que posee la comunidad científica hasta el día de hoy, sobre los acumuladores cinéticos y sus grandes ventajas, con el fin de concienciar a la población mundial de la gran necesidad de invertir más esfuerzos y capital en el desarrollo e investigación de los mismos.

## 1.3 Estructura del documento

El presente escrito se ha estructurado en un total de 6 capítulos, siguiendo un orden coherente para la correcta comprensión de los sistemas aquí descritos.

Como se ha podido observar, el [primer capítulo](#) sirve a modo de introducción, que comprende un breve resumen del contenido, una presentación de las razones que motivan la redacción del documento y unos objetivos que se pretenden alcanzar.

En el [capítulo segundo](#) se documenta el marco histórico de los acumuladores cinéticos, desde los primeros indicios de acumulación de energía cinética hasta la actualidad, recogiendo los hechos más significativos.

En el [tercer capítulo](#) se da una definición general y actualizada de los acumuladores cinéticos y se presenta el criterio que se ha seguido para su clasificación. También se define cada tipo con sus respectivos subtipos de forma más precisa, aportando ejemplos y aplicaciones de casos reales en la medida de lo posible.

En el [cuarto capítulo](#) se realiza una comparativa de los distintos acumuladores cinéticos con los sistemas de acumulación de energía actuales contra los que compiten en el mercado, primero de forma cualitativa y después de forma cuantitativa, para que el lector tenga una visión general del ámbito tecnológico en el que se encuentran.

El [capítulo quinto](#) exponen las tendencias que siguen actualmente los investigadores en la materia, con el fin de mejorar los sistemas actuales o de crear nuevas formas de acumulación de energía cinética.

Por último, en el [capítulo sexto](#) se argumentan las conclusiones que se han sacado de la realización del documento.

## 2 HISTORIA DE LOS ACUMULADORES CINÉTICOS

### 2.1 Marco histórico y evolución de la tecnología

Los primeros antecedentes de los sistemas de acumulación de la energía cinética se registran en torno al año 6000 a.C. en Mesopotamia y China ([enlace 1](#)). Los primitivos acumuladores consistían en discos inerciales, hoy más conocidos como volantes de inercia, fabricados a partir de madera, cuya función era la equivalente a la rueda de alfarero que se utiliza para el moldeado de piezas de cerámica. ([enlace 2](#)) Los siguientes hallazgos indican que se comenzaron a fabricar discos de arcilla con fibras insertadas de bambú para aumentar su resistencia, y algo más tarde se comenzaron a utilizar discos tallados en piedra, que permitían alcanzar mayores velocidades de giro.

La homogeneidad en la geometría y el acabado de los discos se fue perfeccionando y fue alrededor del año 1200 d.C. cuando se comenzaron a registrar ilustraciones de mecanismos para accionar el volante con el pie, y de esta forma poder trabajar simultáneamente con ambas manos y conseguir ejercer un mayor momento al accionarlo. Estos mecanismos se comenzaron a utilizar en el ámbito de la cerámica pero se adaptaron rápidamente al proceso de hilado, aumentando considerablemente la velocidad y la comodidad de ambos procesos.

Posteriormente, a finales del siglo XIII, volvieron a cobrar protagonismo en su aplicación a los máquinas de vapor. Se unían brazos o manivelas para convertir movimientos alternantes en rotativos. Los volantes eran de grandes tamaños y se fabricaban por moldeo de hierro fundido en forma de rueda o llanta, por lo que eran muy pesados y requerían grandes esfuerzos para iniciarlos.

Durante el siglo XIX, los motores a vapor fueron evolucionando y creciendo de tamaño y potencia, y los volantes de inercia crecieron con ellos, hasta el punto de alcanzar los 9 metros de diámetro en motores de 12 metros de altura capaces de producir alrededor de 1 MW. En relación a los volantes actuales, estos grandes discos de hierro eran demasiado lentos y pesados. Como media, un volante de 50 toneladas podía producir aproximadamente 5 kWh, girando a una velocidad superficial de 20 m/s. [\[1\]](#)

Con el nacimiento de la industria automovilística, los volantes de inercia se consolidaron como los reguladores de potencia mecánica por excelencia, y aún sigue siendo un elemento fundamental en los motores de combustión. Frente a la falta de medidas de seguridad eficaces, las catástrofes y accidentes relacionados con fallos debidos a la operación o a la integridad estructural de los volantes de inercia eran relativamente frecuentes, en ocasiones hasta dando lugar a destrucción de grandes edificios y fábricas.

En 1917, se publicó la primera traducción al inglés del estudio del doctor Aurel Boleslav Stodola ([enlace 3](#)) en el que se realiza un análisis tensional y del efecto de las distintas geometrías de los volantes de inercia. El libro compuesto por dos tomos, se sigue tomando como referencia hoy en día. [2]

Al final de la década de los 70, se comenzó a experimentar con rotores de materiales compuestos, obteniendo resultados estructural y dinámicamente mejores que con los metálicos tradicionales. Las mejoras conseguidas con los materiales compuestos despertaron el interés del sector energético y como resultado, pocos años después se propuso una forma de reducir considerablemente las pérdidas por fricción en los mecanismos de soporte y unión: cojinetes magnéticos. Con ellos, el volante de inercia queda sostenido por acción magnética en lugar de mecánica, por lo que se eliminan los contactos y rozamientos. Aunque los primeros cojinetes magnéticos no permitieran altas velocidades, supusieron un aumento del rendimiento del sistema, fomentando la investigación en la materia. [1]

Paralelamente, desde finales del siglo XVIII se comienza a comprender y a controlar la electricidad. Alessandro Volta, Werner Von Siemens, Christian Oersted, Michael Faraday, Joseph Henry, Nikola Tesla y Heinrich Lenz son algunos de los principales pioneros de la tecnología eléctrica. En 1867 se patentó el primer indicio de conversor de energía cinética en energía eléctrica: la dinamo. Los avances en el desarrollo de las baterías hicieron que el interés por los acumuladores cinéticos decayera, hasta que se descubrieron las ventajas que aportan los volantes de inercia a los sistemas eléctricos en cuanto a regulación de la calidad energética.

Con la evolución de la industria eléctrica y la consolidación de la electrónica se comenzaron a plantear diseños de coches eléctricos alrededor de 1970, en los cuales se proponían volantes de inercia como fuente de energía secundaria. Sus aplicaciones a motores y fuentes de energía estacionarias no tardaron en llegar, utilizándose como fuente de energía de emergencia frente a posibles fallos de la red eléctrica.

Los grandes avances en el diseño de los acumuladores cinéticos y en las revolucionarias máquinas eléctricas *reversibles*, los motores-generadores, supusieron que se condujeran numerosas investigaciones sobre la combinación de ambos, entre otras razones, para poder abastecer a la creciente demanda de energía eléctrica.

## 2.2 Los acumuladores cinéticos en la actualidad

Uno de los principales problemas de la sociedad actual reside en el abuso de los combustibles fósiles como fuente de energía y las consecuencias ambientales, sociales, económicas, etc. que provocan. La transición a fuentes de energía renovables o *limpias* se está llevando a cabo, sobre todo en los países desarrollados.

Ante la gran demanda de energía eléctrica que requiere esta transición, sumada a la enorme demanda que ya existe en la actualidad, es primordial encontrar formas de almacenamiento y regeneración de *energía limpia*. Por ello, la industria energética está apostando por la combinación de acumuladores cinéticos y energías renovables, que realizan tanto la función de control de la calidad energética como la de acumulación de la energía generada en forma de energía cinética. Además, los acumuladores cinéticos han demostrado una buena adaptabilidad con los sistemas de

almacenamiento de energía en baterías, demostrándolo en motores híbridos y eléctricos.

Actualmente se pueden considerar varias líneas de investigación en torno a los acumuladores. Algunas de ellas son: materiales y geometrías del rotor, cojinetes magnéticos y superconductores, regeneración de energía cinética desaprovechada o métodos de transmisión cinético-eléctricos.

### 3 COMPLEMENTOS TEÓRICOS

#### 3.1 Teoría básica sobre los acumuladores cinéticos de energía

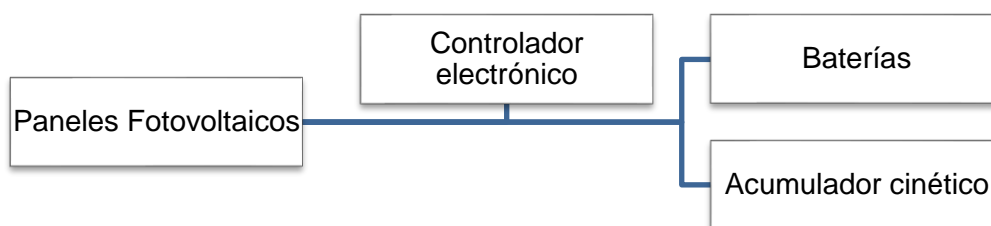
##### 3.1.1 Definición de acumulador cinético y aplicaciones

Originalmente, un acumulador cinético se define como cualquier sistema o mecanismo capaz de transformar un trabajo o una fuerza en energía cinética y almacenarla, manteniendo un sólido de masa considerable en movimiento. Pero los recientes avances en materia de aprovechamiento de la energía cinética han dejado esta definición obsoleta, ya que han surgido nuevos sistemas que integran motores/generadores eléctricos para almacenar la energía obtenida de la fuerza o trabajo en forma de electricidad, en lugar de energía cinética.

Por tanto, en la actualidad se entiende por acumulador cinético como aquel sistema o mecanismo que sea capaz de obtener energía cinética útil a partir de una fuerza o trabajo y almacenarla, ya sea en forma de energía cinética o convirtiéndola en energía eléctrica para su almacenamiento en baterías.

Los acumuladores cinéticos son una forma de generación o almacenamiento de energía alternativa, coloquialmente denominada *energía limpia*. El movimiento que origina la energía cinética puede ser de traslación o de rotación, y existen varios modelos y configuraciones posibles para el diseño de estos sistemas.

La acumulación de energía cinética ha resultado ser una pieza de gran importancia en el ámbito energético, uniéndose a los recientes avances en los sistemas generadores de energías renovables de las últimas décadas. Las aplicaciones de estos sistemas son muy variadas: desde la recuperación y almacenamiento de la energía disipada o sobrante de una acción mecánica, como por ejemplo la de un freno regenerativo, hasta el almacenamiento de energía eléctrica que, al alcanzar el límite de capacidad de una batería o conjunto de ellas, es convertida a su forma cinética para su almacenamiento en un sistema mecánico. Este último caso se puede dar por ejemplo en una instalación de paneles solares que tras trabajar a pleno rendimiento, ha llenado las baterías, o en su defecto no se requiere la energía que está generando (*Imagen 2*). En estos casos, se convierte la energía eléctrica en cinética, que el acumulador en forma de volante de inercia almacena como complemento a las baterías o bien, directamente como sistema de almacenamiento principal.



*Imagen 2: Esquema simplificado de un generador fotovoltaico con acumulador cinético. Fuente: realización propia.*

Existen varios criterios posibles para clasificar los acumuladores cinéticos. En el siguiente capítulo se clasifican según la forma de energía almacenada por los sistemas.

### **3.1.2 Clasificación elemental de los acumuladores cinéticos.**

Antes de entrar en profundidad en el funcionamiento y componentes de los sistemas de acumulación de energía cinética, es necesario diferenciar correctamente los dos modelos principales que existen en la actualidad. Como se ha mencionado anteriormente, esta primera clasificación se realiza en función de la forma de energía que se quiere almacenar: energía cinética o energía eléctrica.

Si el sistema de acumulación tiene por finalidad la conversión de un trabajo o una fuerza en energía cinética para almacenarla manteniéndola en dicha forma de energía en una masa considerable en movimiento, se trata de un acumulador cinético tradicional o mecánico también denominado batería inercial.

Sin embargo, a los sistemas convierten la energía cinética de una masa en movimiento producido por una fuerza o trabajo directamente en energía eléctrica transmitiendo ese movimiento a un generador eléctrico, se van a denominar de aquí en adelante como sistemas conversores de energía cinética para evitar confusiones con los acumuladores cinéticos tradicionales.

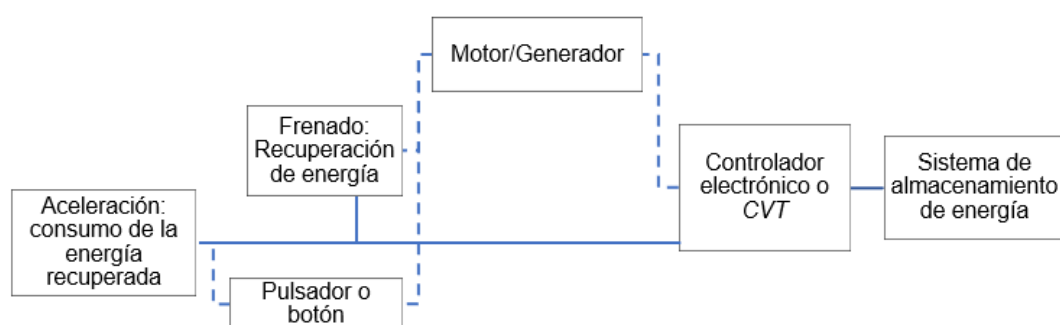
También existen otros sistemas en los cuales la energía recuperada se destina a hacer funcionar un compresor para comprimir aire en un espacio con una válvula de entrada y otra de salida sucedida de una turbina. El propio tanque de aire funciona como almacenador de energía en forma de aire a presión, de forma que cuando ésta es requerida, se abre la válvula de salida para accionar la turbina, que entrega la potencia al sistema motor. Estos sistemas entrarían dentro de los conversores de energía, pero son menos comunes, ya que dependen del volumen del tanque de almacenamiento y por tanto la presión del aire en su interior es limitada, por ello en el presente documento no se entrará en el estudio de dichos sistemas en profundidad.



Un claro ejemplo de acumulador cinético, es un sistema de freno regenerativo, denominado en el mundo de la Fórmula 1 como ([enlace 4](#)) (*Kinetic Energy Recovery System*) (*Imagen 3*), por el cual se recupera la energía que se disipa durante la frenada de un tren, un coche o vehículo similar. Esta energía se disipa normalmente en forma de calor cuando los frenos actúan para reducir la velocidad del vehículo, sin embargo, usando el freno regenerativo, esta energía se canaliza para convertirla en energía útil, pudiendo ser almacenada de tres formas:

1. Por medio de aire comprimido (En desuso por su capacidad de almacenamiento limitada, entre otras razones).
2. Comunicándola a un generador eléctrico para poder almacenarla en baterías u otros sistemas de almacenamiento eléctrico (Sistema conversor de energía cinética).
3. En forma de energía cinética de rotación en un volante de inercia (Acumulador cinético tradicional o batería inercial).

Recientemente se han desarrollado modelos mixtos entre los sistemas conversores y los acumuladores cinéticos mecánicos. Estos sistemas son más complejos pero han demostrado ser más versátiles y eficientes para determinadas aplicaciones.



*Imagen 3: Esquema generalizado de un freno regenerativo. Fuente: Realización propia.*

## 3.2 Descripción técnica de los acumuladores cinéticos mecánicos

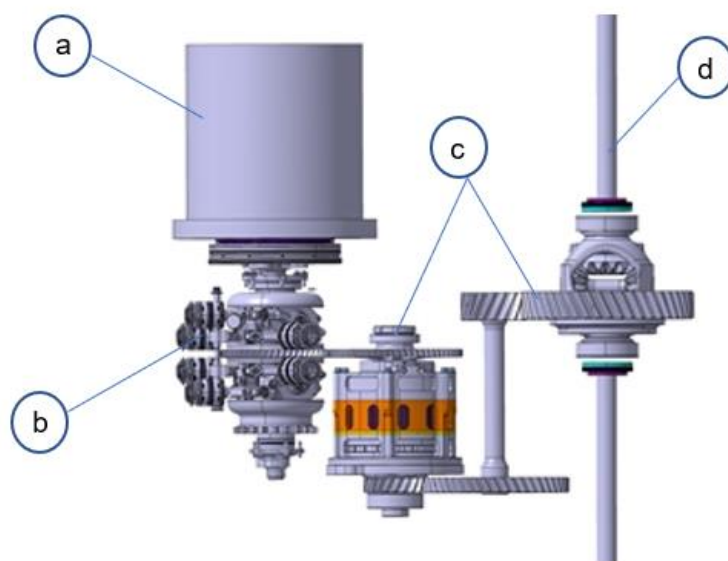
### 3.2.1 Funciones de los componentes del sistema

Los acumuladores cinéticos tradicionales o mecánicos utilizan el movimiento de una masa considerable como método de almacenamiento de energía. Un sistema totalmente basado en un acumulador cinético tradicional no depende de baterías para almacenar la energía, sino que comunica la energía recuperada o generada a un rotor solidario con un volante de inercia poniéndolo en rotación. Cuando la energía es requerida, es el volante de inercia el que la comunica a un mecanismo de transmisión o a un generador eléctrico.



En ocasiones, también se pueden encontrar sistemas mixtos, que integran tanto volantes de inercia como baterías. En estos casos el volante de inercia actúa como sistema de almacenamiento secundario en caso de alcanzar el límite de la capacidad de las baterías o como elemento de control para amortiguar fluctuaciones de potencia.

A continuación, se muestra un esquema simplificado de un sistema acumulador mecánico de energía cinética en la *Imagen 4*, cuyos elementos quedan designados alfabéticamente para facilitar su identificación.



*Imagen 4: Esquema de un acumulador cinético por volante de inercia con transmisión mecánica.  
Fuente: Volvo*

*Leyenda: a. Volante de inercia; b. Transmisión infinitamente variable o CVT; c. Tren de engranajes de entrada/salida de potencia; d. Eje de transmisión*

## 1. Rotor principal

Es el elemento principal de estos sistemas. Se compone de un eje que gira solidario y coaxialmente con un volante de inercia, que es el elemento encargado del almacenamiento de la energía en su forma cinética. El volante de inercia es un disco cilíndrico o cilindro sólido largo que puede estar fabricado de una gran diversidad de materiales según los requerimientos del sistema.

Los volantes de inercia dedicados al almacenamiento de energía cinética parecen ser fáciles de diseñar a simple vista, pero la realidad es que esconden un elaborado proceso de diseño que lo determinan los parámetros utilizados para el cálculo de su rendimiento energético.

Para un correcto proceso de diseño, se deben conocer previamente las ecuaciones que caracterizan el funcionamiento de los volantes de inercia, comenzando por la más elemental, la expresión de la energía cinética generada por una masa en movimiento de rotación:

$$E_C = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2 \quad [J]$$

*Ecuación 1: Expresión de la energía cinética de una masa en rotación*

Donde  $E_C$  representa la energía cinética medida en Julios,  $\omega$  es la velocidad angular de giro expresada en radianes por segundo e  $I$  es el valor del momento de inercia de la masa.

El valor de  $I$  depende de la geometría del volante de inercia. En almacenamiento de energía los dos tipos de geometrías más utilizadas son las de disco cilíndrico macizo y cilindro hueco de pared delgada, cuyas expresiones del momento de inercia proceden de la ecuación general que se muestra a continuación:

$$I = \int r^2 \cdot dm \quad [Kg \cdot m^2]$$

*Ecuación 2: Expresión general para el cálculo del momento de inercia*

Donde  $r$  es el radio y  $dm$  es un diferencial de masa, que puede expresarse también como:

$$dm = \rho \cdot dV = \rho \cdot 2\pi \cdot r \cdot L \cdot dr$$

*Ecuación 3: Descomposición del diferencial de masa*

Donde  $\rho$  expresa la densidad del material del cuerpo en rotación medida en  $Kg/m^3$  y  $dV$  es el diferencial del volumen macizo, que se puede expresar en función del radio  $r$  y la longitud axial  $L$  para una geometría de grosor radial infinitesimal  $dr$ .

Aplicando esta expresión a las distintas configuraciones podemos hallar las ecuaciones del momento de inercia con respecto al eje de giro de cada tipo de geometría del volante de inercia:

Disco cilíndrico macizo	$I = \frac{1}{2} m \cdot r^2$
Cilindro hueco	$I = \frac{1}{2} m \cdot (r_e^2 + r_i^2)$
Cilindro hueco de pared delgada	$I \cong m \cdot r_e^2$
Esfera maciza	$I = \frac{2}{5} m \cdot r^2$
Esfera hueca de pared delgada	$I \cong \frac{2}{3} m \cdot r_e^2$

*Tabla 1: Expresiones de los momentos de inercia de las geometrías más comunes de volantes de inercia*

Donde  $r_e$  es el radio exterior y  $r_i$  el interior en las geometrías huecas.

Observando las fórmulas anteriores, se puede llegar a la conclusión de que la magnitud de la energía cinética aumenta con el aumento del momento de inercia y de la velocidad angular.

Por un lado, aumentar el momento de inercia supone una mayor masa, un mayor radio o ambas. En geometrías huecas también es importante que la suma de los radios sea elevada para obtener un mayor valor del momento de inercia o bien, que la diferencia entre ellos sea infinitesimal para poder aplicar la aproximación de pared delgada. Utilizar una masa muy elevada tiene el inconveniente de la adición de peso extra al conjunto, lo cual es un problema en las aplicaciones donde se busca minimizar la masa como es el caso de la industria automovilística. Un gran radio también puede presentar dificultades, ya que existen muchos casos en los que no se puede disponer de mucho espacio para albergar un cilindro de grandes dimensiones.

Por otro lado, la velocidad angular del eje rotor también guarda relación con las tensiones que se originan entre los diferenciales de masa que componen el material del cuerpo en rotación. Estas tensiones tienen su origen al aplicar una fuerza externa al eje rotor, que se traducen en fuerzas internas. Debido a la continuidad del material macizo, estas fuerzas internas provocan el movimiento del conjunto, pero también establecen un límite de la tensión que se puede alcanzar en el interior del cuerpo sólido.

En adelante, las ecuaciones a utilizar para cuantificar la tensión máxima se van a aplicar a los casos de cilindro macizo uniforme y cilindro hueco de pared delgada por ser las dos geometrías más comunes.

Para el caso de cilindro macizo uniforme, la expresión del límite de tensión es la siguiente:

$$\sigma_{max} = \frac{1}{8} \rho \cdot r^2 \cdot \omega^2 \cdot (3 + \gamma) \quad [Pa]$$

*Ecuación 4: Expresión de la tensión máxima en un cilindro macizo uniforme*

Cuyos parámetros son:

$\sigma_{max}$  : tensión máxima que soporta el material en Pascales

$\rho$  : densidad del material que forma el disco macizo en Kg/m<sup>3</sup>

$r$  : radio del disco en metros

$\omega$  : velocidad angular de rotación en radianes por segundo

$\gamma$  : coeficiente de Poisson del material que forma el disco

Para el caso de cilindro hueco de pared delgada, el cálculo de la tensión máxima sólo es significativo en su dirección circunferencial, siendo la expresión:

$$\sigma_{\theta} = \rho \cdot r^2 \cdot \omega^2 \quad [Pa]$$

*Ecuación 5: Expresión de la tensión circunferencial máxima en un cilindro hueco de pared delgada*

Para integrar estas expresiones en la ecuación de la energía cinética, se debe definir antes el coeficiente de forma  $K$ , que toma valores distintos en función de la geometría de la pieza:

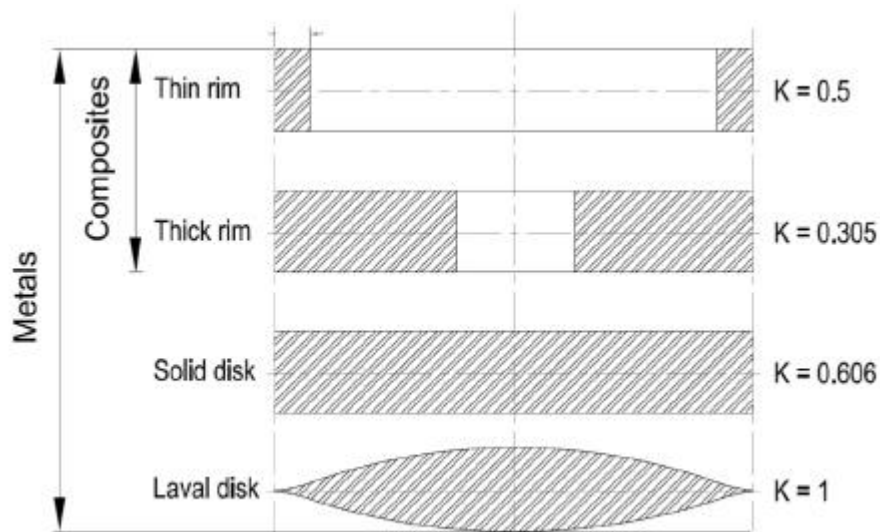
$K = 0.5$  para discos huecos de pared delgada

$K = 0.25$  para discos macizos uniformes

$K = 1$  para disco de Laval

El caso ideal es el correspondiente al disco de Laval, en el que todas las partículas másicas están tensionadas al máximo, por lo que las tensiones radiales y tangenciales inducidas se reparten por igual en todo el material metálico. Sin embargo, en materiales compuestos con gran número de fibras en paralelo, es posible aplicar tensiones considerablemente más grandes en la dirección de las fibras. Es por ello que la geometría del disco de Laval no resulta eficiente para estos materiales, ya que se busca una geometría en la que se puedan maximizar las tensiones en dirección tangencial y minimizar aquellas en dirección radial. [4]

A continuación, se muestra en la *Imagen 5* las geometrías más utilizadas y sus coeficientes de forma  $K$ : [5]



*Imagen 5: Coeficientes de forma  $K$  en función de las geometrías más utilizadas. Fuente: [5]*

Es común en el diseño de los rotores, expresar la energía cinética en forma de energía cinética específica, es decir, por unidad de masa. La ecuación queda por tanto:

$$\frac{E_C}{m} = K \cdot r^2 \cdot \omega^2 \quad [J / Kg]$$

*Ecuación 6: Primera expresión de la energía cinética específica*

Existe también un segundo coeficiente de forma  $K_S$ , cuyo valor para discos huecos de pared delgada es similar al de  $K$ , pero para discos macizos uniformes su valor es de 0.606 (con un coeficiente de Poisson de 0.3). La expresión de la energía cinética específica con  $K_S$  queda definida como:

$$\frac{E_c}{m} = K_S \cdot \frac{\sigma}{\rho} \quad [J / Kg]$$

*Ecuación 7: Segunda expresión de la energía cinética específica*

Esta última ecuación es más utilizada ya con ella se puede calcular la energía cinética específica máxima en relación a la tensión máxima del material.

También es común expresar la energía cinética almacenada en función del volumen del cuerpo en rotación, denominada también densidad de energía cinética:

$$\frac{E_c}{V} = K_S \cdot \sigma \quad [J / m^3]$$

*Ecuación 8: Expresión de la densidad de energía cinética*

De estas dos ecuaciones se puede deducir que:

- Un material ligero pero altamente resistente produce más energía específica que un material pesado altamente resistente.
- Para un mismo valor de tensión máxima, un disco macizo uniforme produce más energía específica que un disco hueco de pared delgada. [6]

Es por esto que los materiales compuestos como la fibra de vidrio o la fibra de carbono, al repartir mejor las tensiones internas, poseen una mayor resistencia mecánica a las tensiones originadas por los momentos angulares, los esfuerzos mecánicos y la fuerza centrífuga. Al fabricar un volante de inercia de un material compuesto, se resta masa al conjunto pero se aumenta considerablemente el límite de tensión admisible, y por consiguiente la velocidad angular máxima que puede alcanzar. Sin embargo, los materiales compuestos hoy en día no están tan desarrollados como los metálicos, por ello, se siguen fabricando más volantes de inercia metálicos que de materiales compuestos. Para aquellos que requieren velocidades angulares muy altas, existe una gama de materiales metálicos de muy alta calidad que poco a poco se van sustituyendo por los materiales compuestos. En la siguiente tabla, se muestran los datos de los materiales más comúnmente utilizados para el diseño del rotor:

<b>MATERIAL</b>	<b>DENSIDAD [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>RESISTENCIA A LA TENSIÓN [GPa]</b>	<b>ENERGÍA ESPECÍFICA [Wh/kg]</b>
<b>Metálicos</b>			
AISI-SAE 4320	7700	1.52	50
AISI 4340	7800	1.80	64
<b>Aleaciones</b>			
AlMnMg	2700	0.60	62
<b>Titanio</b>			
TiAl6Zr	4500	1.20	74
<b>Compuestos</b>			
Fibra de vidrio-E	200	0.10	14
Fibra de vidrio-S	1920	1.4	210
Fibra de carbono T1000	1520	1.95	350

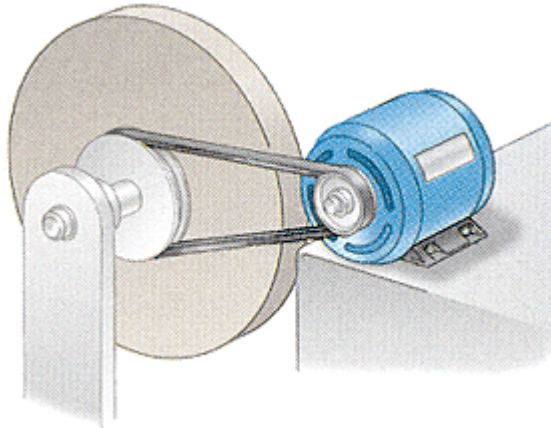
Tabla 2: Propiedades de los principales materiales de los rotores.

## 2. Transmisión de potencia

En el caso de acumulación cinética por volante de inercia, la transmisión de potencia puede ser mecánica o eléctrica. Lo más común es utilizar un motor/generador eléctrico para comunicar la potencia al rotor, pero también se han llevado a la práctica diseños en los que un mecanismo denominado *CVT* (*Continuously Variable Transmission*), es el encargado de comunicar la potencia mecánica al rotor mediante un sistema de engranajes planetario y poleas de diámetro variable.

En los sistemas que integran transmisión de potencia eléctrica, el volante de inercia funciona como rotor del motor/generador eléctrico. Su funcionamiento es similar al de un sistema conversor de energía, solo que el rotor está diseñado para permanecer girando el mayor tiempo posible, por tanto, se puede decir que las configuraciones de este tipo combinan los dos sistemas. El único inconveniente de estos sistemas es que la resistencia que el motor eléctrico ofrece cuando se induce una corriente en el mismo puede reducir ligeramente el rendimiento del volante de inercia. El funcionamiento del motor/generador queda detallado en el punto [3.3.1](#).

El estator de los motores/generadores eléctricos puede estar dispuesto coaxialmente con el volante de inercia, coaxialmente al eje del volante, o en otro eje perpendicular al del volante unido a él por una correa u otro medio de transmisión (*Imagen 6*).



*Imagen 6: Volante de inercia con M/G acoplado por correa de transmisión. Fuente: Google*

Los motores/generadores acoplados a los volantes de inercia pueden ser homopolares (HM), de reluctancia (RM), de inducción (IM), *brushless* de corriente continua (BLDCM) o con distintas configuraciones de imanes permanentes (por ejemplo, de tipo síncrono o PMSM). Para la elección del tipo de motor/generador, se debe tener en gran consideración el sistema de refrigeración del volante de inercia, ya que se pueden alcanzar temperaturas muy elevadas que pueden ocasionar daños en el estator. En los diseños actuales con volantes de inercia de materiales compuestos, se utilizan imanes permanentes para evitar temperaturas que puedan dañar la integridad del rotor.

En caso de transmisión de potencia mecánica, la CVT o transmisión infinitamente variable [7] es la encargada de hacer rotar el volante de inercia. Este mecanismo se lleva utilizando en una amplia gama de vehículos de ruedas desde hace años, pero ha encontrado una nueva aplicación con la introducción del volante de inercia, sobre todo en vehículos híbridos.

La CVT consta de dos poleas cónicas unidas por una correa normalmente metálica. Una de las poleas está conectada con el volante de inercia (polea secundaria) mientras la otra está conectada con un sistema de engranajes planetario (polea primaria) y un sistema de embrague.

Las poleas cónicas ajustan sincronizadamente su diámetro efectivo normalmente, por medio de un controlador electrónico, a veces denominado regulador de potencia. De esta forma, cuando la polea primaria comienza a girar, transmite dicha rotación a la secundaria y ambas comienzan a variar su diámetro efectivo sincronizadamente para hacer que la transmisión de la potencia sea lo menos brusca posible.

Cuando se requiere que el volante de inercia entregue la potencia mecánica, almacenada en forma de energía cinética de rotación, uno o más embragues actúan sobre el conjunto de engranajes planetario para invertir el sentido de giro



del eje que previamente ha aportado la potencia mecánica. En la *Imagen 7* se muestra un diseño esquemático de una CVT común.



*Imagen 7: Diseño de una CVT común. Fuente: Google*

*Leyenda: a. Polea secundaria; b. Polea primaria; c. Correa de transmisión metálica*

### 3. Sistema de suspensión del rotor

En los sistemas mecánicos de recuperación de energía es muy frecuente que se den cargas externas debido a la inercia producida por el movimiento del conjunto donde está montado, que se suman al peso propio del volante y las cargas internas originadas por la rotación del rotor.

Por ello, el conjunto eje rotor necesita un sistema de apoyo adecuado para garantizar que el volante de inercia gire sobre su propio eje y así minimizar pérdidas de energía. Existen varios métodos para eliminar traslaciones o rotaciones indeseadas en el eje rotor. La selección del más óptimo depende de la aplicación donde esté montado. A continuación, se enumeran los sistemas de suspensión más utilizados:

- I. Rodamientos de bolas: Son los mecanismos de suspensión más sencillos y baratos, pero también los menos eficientes. Se utiliza en casos en los que no se requiere que el volante de inercia se mantenga rotando durante un largo periodo de tiempo y se quieren minimizar costes al máximo. Los rodamientos de bolas tienen varios inconvenientes. El más importante es que requieren el uso de lubricantes para minimizar rozamientos. En los casos en los que el rotor trabaje en condiciones de vacío, surge la necesidad de estudiar la viabilidad de los lubricantes antes de elegir ya que algunos aceites y grasas pueden alcanzar su presión de vaporización, perdiendo capacidad lubricante y pudiendo dañar los componentes. También es necesario controlar la temperatura que se alcanza en los rodamientos ya que, al haber rozamientos, es posible que surjan inconvenientes a altas revoluciones de giro [8].



- II. Cojinetes magnéticos: Estos métodos de suspensión utilizan la fuerza magnética de repulsión entre dos cargas del mismo signo para sustentar el rotor sobre el estator. Los cojinetes magnéticos han resultado ser un avance crucial en la evolución de los volantes de inercia, ya que eliminan la necesidad de lubricantes y permiten velocidades de giro mucho más elevadas. Existen dos tipos de cojinetes magnéticos en la actualidad, según utilicen imanes permanentes o electroimanes:

II.a Cojinetes magnéticos pasivos o *PMB (Permanent Magnet Bearing)*. Como su nombre indica, funcionan de forma pasiva, lo que quiere decir que no necesitan un aporte de energía externo ya que son dos o más imanes permanentes colocados de forma que la fuerza de repulsión que experimentan sus polos de la misma carga sirva para sostener al rotor [6]. Son soluciones generalmente baratas y la fuerza de los imanes permanentes, normalmente de neodimio, es duradera por lo que no requieren un alto grado de mantenimiento. El problema de estos sistemas es que el espacio que queda entre los dos imanes permanentes, a pesar de ser mínimo, permite cierto grado de libertad de movimiento al rotor. Otro inconveniente en sistemas diseñados para trabajar en vacío, y más si giran a altas revoluciones, es el bajo nivel de refrigeración que puede causar una degradación de las propiedades magnéticas de los cojinetes. Por estas razones, se suelen utilizar en combinación con otro método de suspensión y se deben probar experimentalmente funcionando a altas revoluciones durante ciclos largos para asegurar que soporten las altas temperaturas y establecer los límites de fatiga térmica.

II.b Cojinetes magnéticos activos o *AMB (Active Magnetic Bearings)*. En este caso, los cojinetes son electroimanes, con el mismo principio de funcionamiento que los *PMB*, pero controlados electrónicamente. De forma que si se producen esfuerzos que puedan desviar al rotor de su eje, un sensor manda una señal al controlador para que éste corrija la desviación aumentando o disminuyendo la intensidad del campo magnético en las zonas de los electroimanes que correspondan. Este método resulta ser fiable pero costoso, tanto económicamente como energéticamente. Los electroimanes necesitan un suministro eléctrico, igual que los controladores y sensores electrónicos, por lo que la eficiencia energética del conjunto disminuye a cambio de una mayor estabilidad del rotor [6].

- III. Cojinetes magnéticos superconductores o *SMB (Super Magnetic Bearings)*. Existen ciertos materiales en la actualidad que, a temperatura criogénica tienen la capacidad de conducir la energía eléctrica sin resistividad, por lo que no disipan parte de la energía como los conductores normales. Otros, denominados superconductores de alta temperatura, actúan de tal forma que por encima de una temperatura de transición  $T_C$ , permiten que un flujo magnético pase a través de ellos, pero por debajo de dicha temperatura parte del flujo queda congelado en el superconductor. Cuando estos materiales interactúan con un imán permanente, ejercen una fuerza de repulsión a sus campos magnéticos y de producir corrientes de apantallamiento que se traducen en fuerzas de oposición a cualquier fuerza

que intente mover el imán de su posición de equilibrio. En caso de los superconductores de alta temperatura, la posición de equilibrio sería la de máxima refrigeración del superconductor. [9]

Las características descritas permiten que, bajo las condiciones de superconductividad de un material superconductor, un imán o electroimán pueda levitar, incluso rotando, sobre su superficie y además, autocontrolar su posición con gran efectividad oponiéndose rápidamente a fuerzas circunferenciales y radiales que intenten desviarlo. Esta tecnología no ha tardado en llegar a los acumuladores cinéticos por volante de inercia obteniéndose muy buenos resultados en los primeros prototipos.

La desventaja de este método es la necesidad de someter al material a condiciones ambientales extremas para que pueda actuar como superconductor. En la actualidad hay abiertas numerosas líneas de investigación sobre estos materiales para averiguar si es posible desarrollar un superconductor que pueda trabajar a temperatura ambiente.

#### 4. Carcasa de cobertura exterior

La carcasa que recubre el volante de inercia puede parecer a simple vista de poca importancia para el funcionamiento del sistema, pero es en realidad uno de los elementos que aportan más eficiencia y más seguridad. Sus dos funciones principales son:

- I. Crear condiciones de vacío en su interior para minimizar la fricción aerodinámica. Esto se consigue mediante un sellado resistente de las juntas de la carcasa en caso de que un motor eléctrico le comunique la energía al volante de inercia, o mediante pequeñas bombas de vacío en caso contrario.

Al igual que con los cojinetes magnéticos activos, las bombas de vacío presentan la desventaja de consumir energía para crear las condiciones de vacío deseadas. Aún así, la energía que se gana con la drástica disminución de rozamiento aerodinámico en vacío es superior a la que consumen estas pequeñas bombas, las cuales tampoco suponen un aumento excesivo del peso, por lo que contribuyen positivamente al aumento de eficiencia del sistema. Algunos fabricantes han optado por utilizar la propia rotación del rotor para accionar la bomba de vacío, pero éste método minimiza la energía almacenada en el volante de inercia y su eficiencia depende de la velocidad del rotor, por lo que no resulta eficaz hasta que el volante alcanza una velocidad de giro determinada.

Otros diseños han planteado la adición de aleaciones metálicas sobre las superficies del volante o la carcasa capaces de absorber los gases liberados en el interior de la misma una vez creado el vacío por una bomba externa. [10]

Otra opción viable es la de introducir gases inertes como el Helio junto con cierta cantidad de aire para reducir las interacciones químicas con el ambiente interior.

- II. Proteger alrededores del volante de inercia frente a posibles fallos del sistema. Como se ha visto anteriormente, los volantes de inercia están sometidos a grandes esfuerzos y tensiones, por lo que existe la posibilidad de que se produzcan fallos en el material. Estos fallos se pueden presentar en forma de grietas, desprendimientos de material o directamente, roturas de componentes como el eje rotor. En caso de que ocurra cualquiera de estos eventos, los componentes o personal cercano al sistema se encuentran en grave peligro de sufrir daños catastróficos. Es por ello que la carcasa que encierra al volante de inercia debe ser lo suficientemente resistente como para soportar los grandes impactos que pueden producirse entre ella y los componentes en su interior girando a altas velocidades. [11]

### 3.2.2 Aplicaciones de los acumuladores cinéticos mecánicos

Cada vez es más amplio el abanico de posibles aplicaciones de los acumuladores cinéticos mecánicos debido a los recientes avances en los materiales y mecanismos que los forman así como en las técnicas de transmisión de la energía. A continuación se presentan las aplicaciones actuales de estos sistemas.

- I. Calidad energética. Las plantas de generación de energía eléctrica con grandes redes de abastecimiento necesitan un sistema de acumulación de energía para evitar grandes fluctuaciones de voltaje y frecuencia frente a cambios significativos tanto en la energía generada como en la consumida. Los acumuladores por volantes de inercia son una solución muy adecuada para estos casos, ya que son capaces de añadir o retirar energía de la red con el fin de mantener el voltaje y la frecuencia en torno a un valor estable.

Hasta el momento, los volantes son capaces de suministrar energía a la red durante aproximadamente 15 segundos en caso de interrupción total del suministro eléctrico convencional y hasta varias horas en caso de interrupción parcial o fluctuaciones dependiendo de la cantidad de demanda de energía de la planta o generador. [6]

Un ejemplo de esta aplicación se ha desarrollado en la costa noroeste de Australia, concretamente en un lugar llamado *Coral Bay*, que experimenta un gran incremento en la demanda de abastecimiento eléctrico en el periodo de afluencia turística. La planta de generación allí construida consta de una capacidad máxima de 675 kW de generación eólica, 2240 kW de generación por gas o diésel para bajo consumo y 500 kWh de acumulador cinético por volante de inercia. Con la adición del acumulador, tan sólo un 5% de la energía requerida durante el periodo de máxima demanda proviene de la combustión del gas o diésel, mientras que el 95% restante puede ser suministrado por los aerogeneradores. ([enlace 5](#))

I.a Regulación de la frecuencia. Las variaciones entre la oferta y la demanda de energía eléctrica provocan variaciones en la frecuencia de la red. Cuando la demanda es superior a la energía generada disponible, la frecuencia disminuye y viceversa. Los volantes de inercia son capaces de absorber esas variaciones

de oferta o demanda para mantener la frecuencia estable, dando mejor respuesta que las baterías debido a su capacidad para pasar de entrega total a recuperación total de energía.

El primer sistema de regulación por volante de inercia documentado se instaló en 2003 en Shimane, Japón, pero fue retirado al año siguiente cuando la empresa instaladora abandonó el sector. El sistema de regulación por volante de inercia más grande documentado es el de *JET (Joint European Torus)*, propiedad de la *EURATOM (European Atomic Energy Community)* y situado en Oxfordshire, Reino Unido. La planta de generación e investigación de fusión, posee dos volantes de inercia de 775 toneladas por volante, y cada uno de ellos es capaz de suministrar 400 MW durante 30 segundos y almacenar hasta 2600 MJ. La función fundamental de estos volantes es la de evitar congestiones de la red, ya que los experimentos que se realizan en el centro consumen mucha energía. Los acumuladores se cargan de energía cinética con energía eléctrica de la red, y al realizar el experimento se descargan aportando los 400 MW junto con 300 MW adicionales de la red. De esta forma se reparte el consumo para no sobrecargar la planta de suministro. En el [enlace 6](#), se pueden ver más detalles sobre el sistema. En la *Imagen 11* se muestra la parte inferior de uno de los volantes de inercia del *JET* durante una operación de mantenimiento.



*Imagen 8: Vista inferior de uno de los volantes de inercia del JET. Fuente: [www.euro-fusion.org](http://www.euro-fusion.org)*

En Estados Unidos, la empresa *Beacon Power* ([enlace 7](#)) ha implantado varios sistemas de almacenamiento y regulación de energía entre los cuales está el de la *NYISO (New York Independent System Operation)*, en Stephentown, Nueva York, que consta de 200 volantes de inercia de 100 MW de capacidad cada uno. Por cada megavatio de energía cinética se consiguen 30 MW de energía para regulación de la frecuencia, lo que supone más del doble de eficiencia que un sistema de regulación convencional. [6]

**I.b Control del voltaje.** Uno de los principales problemas de las grandes industrias es la caída de tensión ocasionada por grandes demandas de energía en periodos cortos de tiempo, que hacen que el voltaje de la red disminuya. Estos casos representan el 92% de los problemas de calidad energética y suelen durar entre 20 y 50 milisegundos. [12] Tradicionalmente se utilizan generadores convencionales secundarios o generadores sobredimensionados para apaliar

estos problemas, pero los volantes de inercia han demostrado ser más eficientes además de no requerir energía adicional para su funcionamiento.

En 2005 se instaló en la isla de Flores, en las Azores, Portugal, un volante de inercia con el objetivo de regular el voltaje de las plantas de generación eólicas y solares que abastecen a la población. El sistema permite además prolongar la oferta de energía cuando las fuentes dejan de generar, por falta de viento o de radiación solar y está aún en funcionamiento. El [enlace 8](#) dirige a la base de datos del *DOE (Department Of Energy)* y muestra datos técnicos del proyecto.

- II. Sistemas *UPS*. Las siglas *UPS* son el acrónimo inglés para fuente de potencia ininterrumpida (*Uninterruptible Power Supply*). Estos sistemas son característicos de edificios o instalaciones cuyo suministro eléctrico debe permanecer constantemente activo. Por ejemplo en un hospital, no se puede interrumpir el suministro de energía ya que se desconectarían los sistemas de soporte vital o la iluminación durante una operación. Normalmente, estos edificios poseen generadores de emergencia que se encienden cuando detectan un fallo en el suministro de la red, pero a veces tardan segundos e incluso minutos en restablecer la energía. Esos segundos o minutos de carencia de energía pueden ser cubiertos por un volante de inercia hasta que el generador de emergencia pueda reestablecer el suministro. Si los cortes de suministro de la red son menores a 15 segundos, se puede instalar un volante de inercia sin necesidad de generadores de emergencia, pero si los cortes tienen mayor duración funcionará como puente entre un sistema de baterías o el generador de emergencia. En el caso de alimentación de emergencia por baterías, el volante tiene la ventaja de suavizar los ciclos de carga y descarga para evitar la degradación de las mismas.

En Estados Unidos, una empresa llamada *VYCON* ([enlace 9](#)) proporciona sistemas *UPS* mediante volantes de inercia. Uno de sus proyectos se sitúa en Texas, para proteger a un centro de gestión de datos frente a pérdidas de suministro energético mediante un volante con capacidad de 8 MW. También tienen proyectos similares en California y todos ellos sin necesidad de baterías de emergencia.

- III. Transporte terrestre. Los acumuladores cinéticos mecánicos (ACM) han demostrado ser uno de los avances más significativos y prometedores en los medios de transporte en los últimos años. Se han conseguido implantar con éxito en coches híbridos y totalmente eléctricos, en trenes también tanto híbridos como eléctricos, autobuses, atracciones de parques temáticos, vehículos de competición y hasta en bicicletas y motocicletas eléctricas. Todas las aplicaciones nombradas utilizan el volante de inercia para una función común: frenos regenerativos.

La industria ferroviaria fue una de las primeras en implantar los acumuladores cinéticos por volante de inercia. Éstos se incorporan en los tramos de frenada de los trenes previos a las entradas de las estaciones o subestaciones. Al aproximarse un tren, los volantes ofrecen resistencia al movimiento absorbiendo ellos parte de la energía de frenado. Dicha energía se convierte en energía

eléctrica que es devuelta a la red normalmente con el fin de ayudar en los procesos de arranque de los trenes. Se estima que una media del 30% de la energía de frenado se puede recuperar mediante estos sistemas. Sin embargo, en 2014, la empresa VYCON instaló un sistema de freno regenerativo por volante de inercia en una de las líneas del metro de Los Ángeles, California, que dio como resultado una media del 66% de la energía de frenado recuperada. [13] Hoy en día, aproximadamente 200 estaciones de metro utilizan acumuladores para disminuir el gasto eléctrico y económico. [6]

Los frenos regenerativos en la industria automovilística tienen su origen en los coches de competición. La *FIA (Federation Internationale de l'Automobile)* introdujo en el año 2009 el freno regenerativo bajo el nombre de *KERS (Kinetic Energy Recovery System)*, con el fin de motivar la investigación de los sistemas para poder implantarlos en vehículos convencionales. El *KERS* en el mundo de la competición está destinado a recuperar la energía de la frenada previa a las curvas para poder utilizarla a la salida de las mismas. El sistema de control electrónico da la posibilidad al piloto de ver la cantidad de energía almacenada en cada instante y mediante un botón, el piloto elige a su criterio el momento en el que entregar esa energía al eje motor. Sin embargo, los frenos regenerativos por volante de inercia no llegaron a triunfar en el mundo de la Fórmula 1, ya que requieren más espacio del que hay disponible y surgieron problemas con la distribución de la masa. En su lugar, se implantaron sistemas conversores de energía cinética que alimentan un conjunto de baterías. En cambio, en vehículos de competición de mayor masa y tamaño, como es el caso de los bólidos de *Le Mans* o de los turismos preparados para la competición, sí han demostrado ser de gran utilidad para mejorar el rendimiento en carrera. En las temporadas 2010, 2013 y 2014, el *Audi R18 e-tron Quattro* ([enlace 10](#)) ganó la carrera considerada como la más exigente tanto para los pilotos como para los equipos, *Le Mans*, con la ayuda de un sistema de propulsión híbrida con un volante de inercia que se alimenta de la energía de frenado y que a su vez alimenta a dos motores eléctricos en el eje delantero. El sistema fue fabricado por la empresa especializada en vehículos de competición *WHP (Williams Hybrid Power)* y ha servido de referencia a los demás equipos de competición y a otros fabricantes de automóviles comerciales.

Los resultados positivos de los frenos regenerativos con volantes de inercia en la competición motivaron a algunos fabricantes de automóviles comerciales a implantarlos en sus diseños. La única diferencia está en el objetivo que persiguen: reducir al máximo las emisiones de los gases de escape reduciendo el consumo de combustible en el caso de automóviles híbridos y aumentar la autonomía de las baterías en automóviles eléctricos.

Cuando se comenzaron a comercializar los vehículos híbridos, la fuente de energía secundaria se consolidó como un conjunto de baterías que entregaban la potencia a motores eléctricos en las ruedas para evitar el consumo de combustible funcionando hasta que se alcanza una determinada velocidad de transición al motor de combustión interna, que suele rondar en torno a los 30 kilómetros por hora. En algunos casos, cada vez más frecuentes debido a los recientes avances en la materia, los motores híbridos utilizan el volante de inercia



como el sistema secundario de almacenamiento de energía en lugar de las baterías. En estos últimos casos no es necesario el uso de motores eléctricos para la conversión de la energía cinética en eléctrica sino que una CVT es la encargada de transmitir la energía mecánicamente del volante al eje motor y viceversa. Por tanto, se pueden clasificar los vehículos híbridos actuales en dos grandes grupos según su sistema de almacenamiento de energía secundario: híbridos eléctricos o conversores de energía cinética, cuya fuente de energía secundaria es eléctrica y se almacena en baterías; e híbridos con sistema de almacenamiento secundario mecánico, que se denominarán de aquí en adelante como híbridos mecánicos y cuya fuente de energía secundaria es mecánica y se almacena en un volante de inercia.

En este apartado se exponen los distintos tipos de configuraciones de los híbridos mecánicos que se pueden encontrar en el mercado según la distribución de los componentes del sistema motor-acumulador:

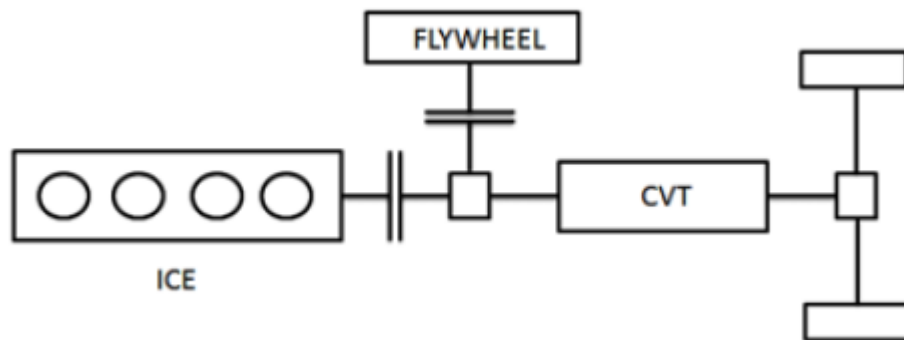


Imagen 9: Configuración en paralelo para híbridos 1. Fuente: [14]

Esta primera configuración se utiliza para vehículos cuya transmisión es infinitamente variable o CVT. El motor de combustión interna (ICE en la imagen) y el volante de inercia (Flywheel) están conectados por sus respectivos embragues a la transmisión (CVT). En esta opción, el motor puede operar eficientemente para cargar de energía cinética al volante de inercia, pero requiere que la velocidad del volante dependa directamente de la velocidad del motor y necesita un sistema de control complejo normalmente electrónico y en algunos casos, un reductor de velocidad en el eje de salida del volante de inercia.

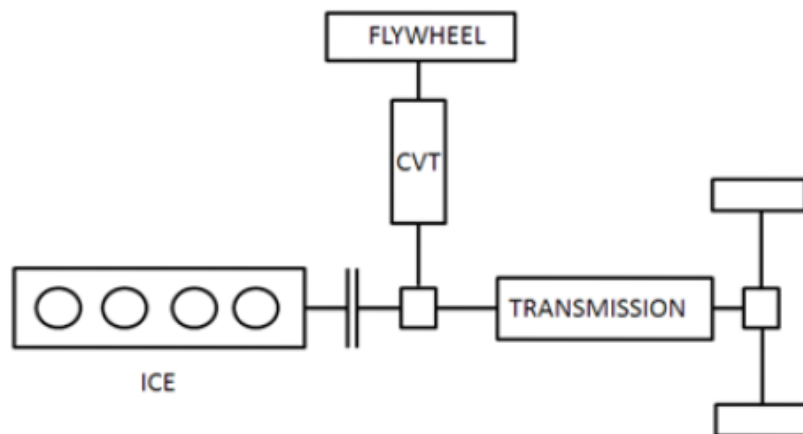


Imagen 10: Configuración en paralelo para híbridos 2. Fuente: [14]

En la segunda configuración, la CVT permite que la velocidad del volante de inercia sea variable con respecto a la velocidad del motor, y una transmisión conectada a estos dos con el eje motriz. El inconveniente de este sistema es la necesidad de una segunda transmisión, que añade peso y costes al conjunto.

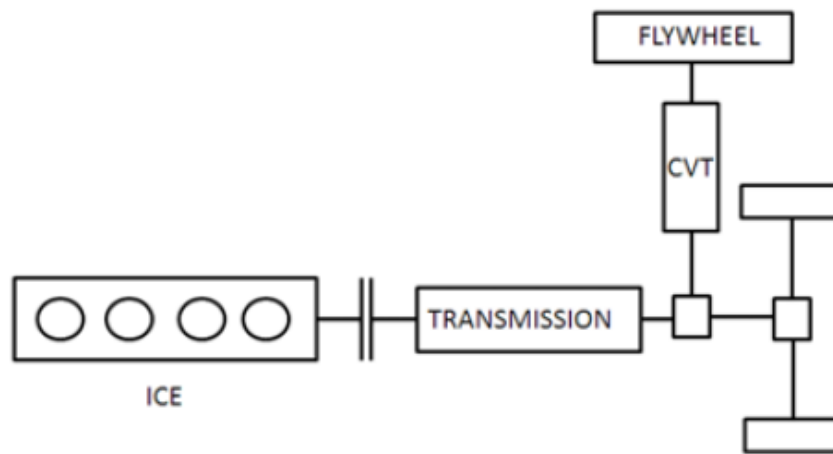


Imagen 11: Configuración en paralelo para híbridos 3. Fuente: [14]

Esta tercera configuración es realmente una variante de la segunda en la que el conjunto volante de inercia – CVT está conectado por un lado directamente al eje motriz y por el otro al motor a través de la transmisión. La ventaja de esta opción es que es relativamente sencillo introducir el conjunto volante – CVT en un vehículo ya existente en caso de que haya espacio suficiente.

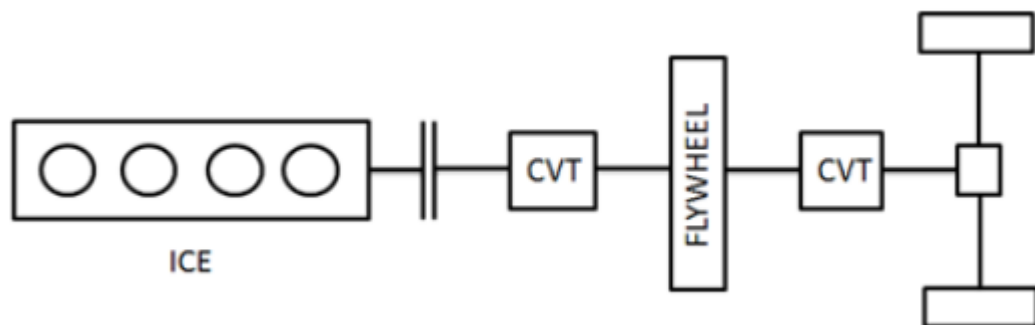


Imagen 12: Configuración en serie para híbridos. Fuente: [14]

En caso de una configuración en serie, el volante de inercia está conectado por un lado al motor y por el otro al eje motriz, ambas conexiones mediante su correspondiente CVT. El volante actúa como elemento intermedio regulador de la potencia obtenida del motor, almacenando la energía en los momentos en los que el eje motriz no la requiere. Estas configuraciones son muy poco frecuentes ya que requieren un volante de inercia mucho más grande y por tanto, una mayor inversión en sistemas de seguridad para su contención en caso de fallo. [14]

En vehículos totalmente eléctricos también se han implantado volantes de inercia para la recuperación de la energía de frenado. En estos casos, un sistema de engranajes planetarios hace posible que una parte o toda la energía cinética de las ruedas durante la frenada se destine a hacer girar un motor/generador eléctrico que actúa como generador comunicando la energía a un motor/generador secundario que comparte eje con el volante de inercia,



haciéndolo girar actuando como motor. En caso de que la energía cinética del volante sea requerida, se invierten las funciones de los motores/generadores anteriores, entregando la potencia al eje motriz. Entre ambos motores/generadores se encuentra un controlador electrónico programado para maximizar la eficiencia en el reparto de energía que entra y sale de las baterías. La ventaja principal de este diseño reside en que el volante y el motor/generador son independientes. La desventaja es la necesidad de instalar dos motores/generadores. Este es el caso del *Porsche GT3 R Hybrid* ([enlace 11](#)).

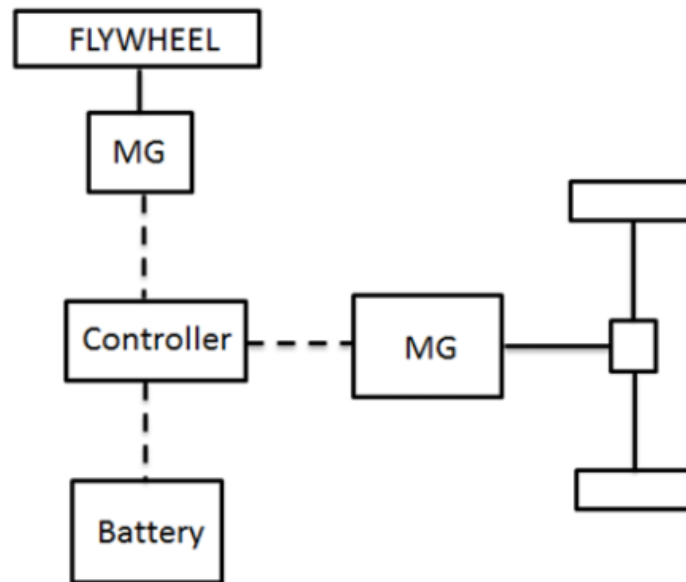


Imagen 13: Configuración en paralelo para eléctricos 1. Fuente: [15]

Otras configuraciones eligen transmitir la potencia de forma mecánica al volante de inercia, mediante el uso de una CVT. La *Imagen 14* y la *Imagen 15* muestran dos posibles diseños con dos posibles disposiciones de la CVT. Su funcionamiento es similar al de las opciones análogas de los híbridos, pero sustituyendo el motor de combustión por un motor/generador eléctrico.

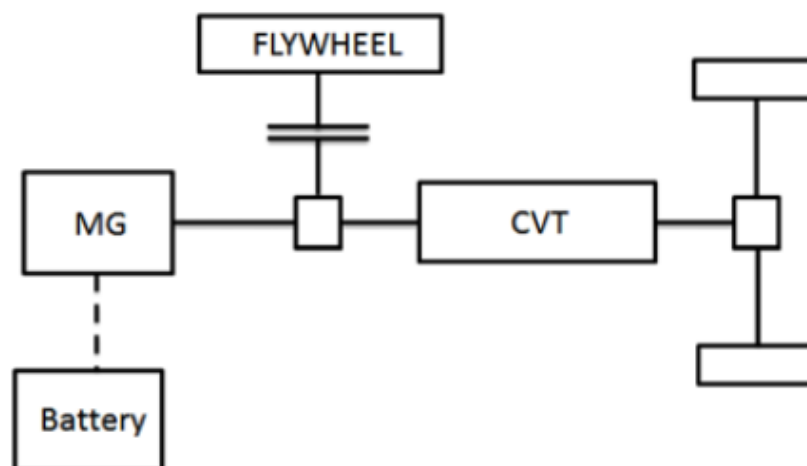


Imagen 14: Configuración en paralelo para eléctricos 2. Fuente: [15]

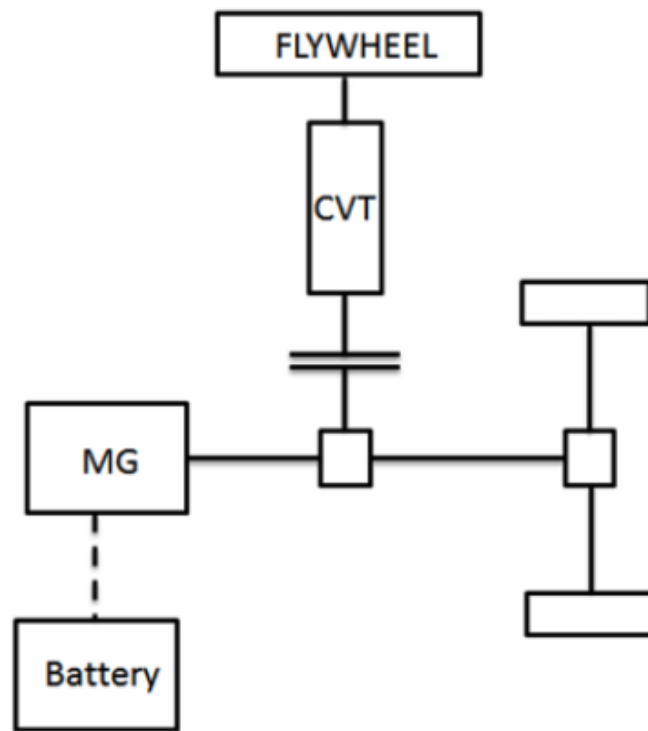


Imagen 15: Configuración en paralelo para eléctricos 3. Fuente: [15]

Otros investigadores proponen métodos alternativos al volante de inercia para recuperar la energía cinética disipada en la frenada: frenos regenerativos por torsión. El estudio llevado a cabo en [16] muestra el diseño de un conjunto en su gran mayoría mecánico, que utiliza muelles de torsión para el almacenamiento de la energía cinética durante el proceso de frenada. En la *Imagen 16* se ilustra un esquema del mecanismo del acumulador por torsión con sus elementos numerados.

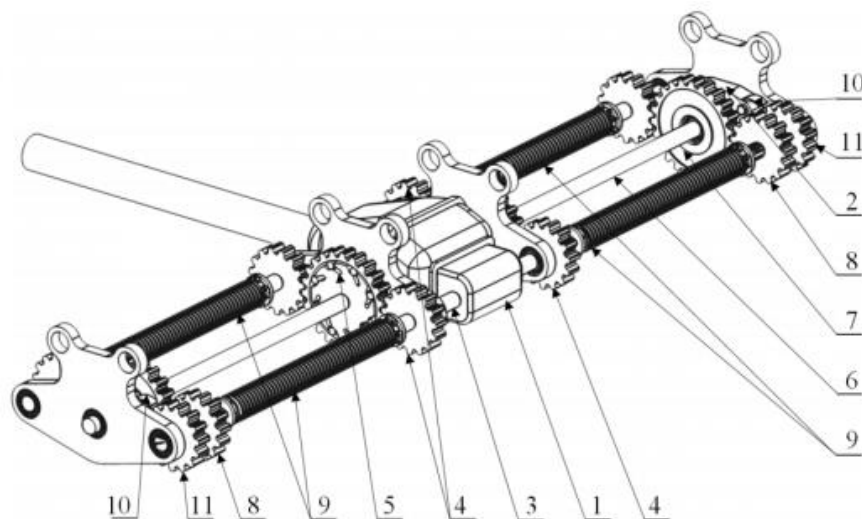
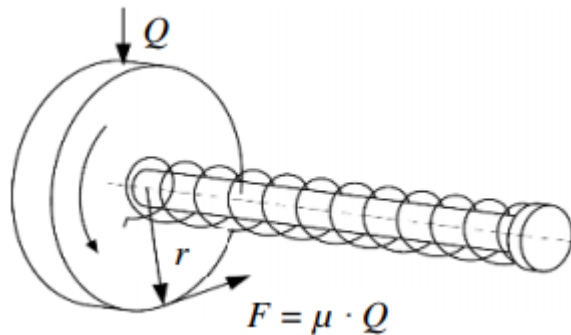


Imagen 16: Esquema del mecanismo del acumulador cinético por torsión. Fuente: [16]

El embrague de fricción (1) se encarga de detener al cuarto eje (3), a los cuartos engranajes (4) y a los embragues unidireccionales (5). Los embragues de agarre (2), transfieren el torque de los ejes motrices (6), a los engranajes primarios (7), provocando la rotación de los engranajes terciarios (8). La diferencia entre las velocidades de rotación de los engranajes terciarios (8) y los cuartos (4) producen la torsión en los muelles de torsión (9). Cuando se alcanza el ángulo deseado de torsión, el embrague de agarre (2) se libera y se accionan los mecanismos de bloqueo (10), dejando los engranajes secundarios (11), primarios (7) y terciarios (8) libres. Cuando se requiere el torque almacenado en los muelles de torsión (9), se libera el embrague de fricción (1), y éstos hacen girar los cuartos engranajes (4) y con la ayuda de los embragues unidireccionales (5), se comunica la rotación a los ejes motrices (6). Cuando se descarga toda la energía de los muelles de torsión (9), los mecanismos de bloqueo (10) se liberan, haciendo posible que el ciclo se repita.

El artículo también pone a disposición del lector las ecuaciones utilizadas para la realización del análisis numérico del sistema. En la *Imagen 17*, se puede observar un boceto esquematizado de una de las ruedas del vehículo ensamblada a uno de los muelles de torsión sobre los cuales se ha dibujado el diagrama de fuerzas correspondiente.



*Imagen 17: Diagrama de fuerzas sobre uno de los muelles de torsión ensamblado a una de las ruedas del vehículo. Fuente: [16]*

En la imagen,  $Q$  representa la carga ejercida sobre la rueda,  $r$  es el radio de la rueda,  $\mu$  es el coeficiente de rozamiento entre la carretera y la rueda y  $F$  la fuerza de rozamiento correspondiente. El momento de torsión máximo del muelle viene dado por la *Ecuación 9*.

$$T_{max} = F \cdot r = \mu \cdot Q \cdot r \quad [N \cdot m]$$

*Ecuación 9: Momento máximo que experimenta el muelle de torsión.*

En función de la aplicación del muelle se debe seleccionar el diámetro del mismo para asegurar que cumple con las condiciones límites de tensión que experimentará durante el funcionamiento del sistema. Para ello, se define el índice de torsión adimensional,  $C$  :

$$C = \frac{D}{d}$$

*Ecuación 10: Índice de torsión del muelle de torsión.*

En la expresión anterior, el coeficiente  $D$  define el diámetro exterior del muelle, mientras el coeficiente  $d$  representa el diámetro de la fibra del muelle. Cuanto más pequeño sea el índice  $C$ , más sufrirán las fibras del muelle cercanas al eje de simetría axial. Por ello, es recomendable que el valor de  $C$  no sea menor de 3. Este índice sirve también para cuantificar el factor adimensional  $K$ , que es la relación entre la sección del muelle y la curvatura de las fibras.

$$K = \frac{4C - 1}{4C - 4}$$

*Ecuación 11: Factor  $K$  del muelle de torsión.*

Es importante definir la relación entre el momento máximo del muelle y la tensión máxima de torsión que puede soportar el material a utilizar, la cual se va a denominar como  $R_{T,max}$  y se calcula en función del valor de resistencia a la tensión del material,  $R_m$  :

$$R_{T,max} = 0.7 \cdot R_m \quad [Pa]$$

*Ecuación 12: Expresión de la resistencia máxima a la torsión del muelle.*

La relación con el momento máximo del muelle viene dada en la *Ecuación 13*:

$$T_{max} = R_{T,max} \cdot \frac{\pi \cdot d^3}{32 \cdot K} \quad [N \cdot m]$$

*Ecuación 13: Expresión del momento máximo del muelle en función de la resistencia máxima a la torsión, el factor  $K$  y el diámetro de las fibras  $d$ .*

El ángulo máximo de torsión también puede ser calculado en función de la resistencia máxima a la torsión, la longitud de la sección del muelle, el factor  $K$ , el número de vueltas del muelle  $n$ , el diámetro de las fibras y el módulo de Young,  $E$ , según la *Ecuación 14* :

$$\varphi_{max} = 114.5 \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot n}{K \cdot d \cdot E} \quad [^\circ]$$

*Ecuación 14: Expresión del ángulo de torsión máximo.*

El ángulo máximo de torsión, producido por el momento torsor  $T_{max}$ , debe compararse con el valor del ángulo límite dado por el material,  $\Phi_{lim}$ , tomando un valor de coeficiente de seguridad igual a 2 :

$$\varphi_{lim} = 123.1 \cdot (n)^{\frac{1}{4}} \quad [^\circ]$$

*Ecuación 15: Expresión del ángulo límite de torsión.*

Si el ángulo máximo es menor que el ángulo límite, significa que el diseño es seguro frente a fallos mecánicos. Cuanto menor sea con respecto al valor límite, mayor seguridad en el diseño. A la hora de elegir el muelle, también hay que tener en cuenta el incremento de la longitud cuando éste está torsionado, además de la correspondiente reducción del diámetro de la sección para cumplir con las restricciones geométricas del sistema donde se va a instalar. El análisis matemático del diseño concluye que cuanto más largo sea el muelle, menor será la reducción de diámetro y la variación de la longitud, lo cual facilita considerablemente su operación y aumenta su vida útil.

Aunque los muelles de torsión almacenan la energía en su forma elástica en lugar de cinética, sus operaciones de carga y descarga implican transferencia de energía cinética, por ello merecen ser incluidos en este estudio. El diseño constituye una opción viable para la recuperación de la energía cinética de la frenada en vehículos de cuatro ruedas. El hecho de que el mecanismo pueda acoplarse directamente al eje del vehículo y que no ocupe demasiado espacio lo constituye como una opción segura para la recuperación de la energía de frenado, ventaja que prima entre los actuales fabricantes, pero por otro lado, su capacidad de almacenamiento energético es menor debido a la restricción que supone el límite de torsión de los muelles y no conviene que los muelles se encuentren torsionados durante mucho tiempo en un mismo ciclo, tanto por posibles fallos en el sistema de retención como por la propia degradación estructural de los muelles.

Los trenes y automóviles no han sido los únicos medios de transporte terrestre que se han beneficiado de las ventajas de los acumuladores por volante de inercia. Los autobuses, en especial los urbanos, están continuamente sometidos a ciclos de arranque y parada, principal razón por la cual los volantes de inercia aumentan considerablemente su eficiencia energética. El primer registro de un autobús de línea que incorpora un sistema de acumulación de energía mecánico es el *Gyrobús*, concebido por la empresa suiza *Oerlikon* entre los años 1940 y 1950. En un principio, el *Gyrobús* se diseñó para trayectos interurbanos a los que no llegaba el tendido eléctrico del que se alimentaban los autobuses de algunos de los núcleos urbanos de Suiza. El volante de inercia pesaba alrededor de los 1500 Kg, tenía un diámetro de 1.6 m, era de transmisión eléctrica y se cargaba en las estaciones de carga dispuestas en las paradas. Los 32 MJ aportados por el volante de inercia permitían recorrer una distancia de 1.2 Km prescindiendo del motor de combustión. [14] Actualmente, existe una gran variedad de configuraciones posibles para la implantación de acumuladores mecánicos en autobuses. Algunos diseños se limitan a combinar el motor de combustión interna con el acumulador [17][18], pero la mayoría de los autobuses en los que se han implantado utilizan un sistema de propulsión híbrido con baterías eléctricas y un motor de combustión [19]. También se ha demostrado que es posible combinarlos con autobuses totalmente eléctricos [20].

En el artículo referenciado en [21] se plantea la combinación del sistema de acumulación mecánico en un autobús eléctrico con pilas de combustible en lugar de baterías convencionales.

- IV. Transporte marítimo. En barcos convencionales las aplicaciones de los acumuladores cinéticos son muy limitadas. Sin embargo, la reciente evolución de los sistemas de propulsión eléctricos ha llegado también al ámbito de la ingeniería naval y como se ha explicado en los apartados previos, donde hay un motor/generador eléctrico es recomendable el uso de acumuladores por volante de inercia para controlar la calidad energética y ahorrar en consumo cuando sea posible. Un estudio [22] compara las variaciones temporales del voltaje, la frecuencia, la intensidad de corriente y la potencia durante los primeros veinte segundos tras el encendido de un motor eléctrico de pasos de alta potencia diseñado como sistema de propulsión principal de un barco de gran tamaño. Los resultados muestran mejoras en todas las variables en cuanto a fluctuaciones indeseadas. A su vez, el volante de inercia gana energía cinética que puede ser utilizada por el motor/generador.
- V. Renovables. Las energías renovables también se han sumado a las numerosas aplicaciones de los acumuladores por volante de inercia. Las principales ramas de la generación de energía por medios renovables que se benefician de las ventajas de este tipo de acumuladores son la eólica y la solar. Esto se debe a que tanto la calidad como la cantidad de la energía generada por estas fuentes es muy variable. Por ejemplo, en un aerogenerador de velocidad variable, la velocidad de rotación de las palas varía cada vez que varía la velocidad del viento y por consiguiente, varía también la velocidad de generación de la energía, al igual que en las placas solares, en las que la eficiencia de la generación varía según la incidencia de la radiación solar entre otros factores. Por tanto en estos casos, los volantes tienen principalmente dos funciones muy relacionadas entre sí: control del voltaje y frecuencia de la energía eléctrica generada en relación a la oferta-demanda (i.e. control del calidad de la energía) y absorber las subidas o bajadas drásticas o 'picos' de la energía generada para poder suministrarla de forma constante. En el apartado *1. Calidad energética* de esta sección se exponen ejemplos de la implantación de acumuladores en aerogeneradores.

Pero la aplicación de los acumuladores mecánicos en energías renovables no se limita sólo a la generación eólica y solar, también se han implantado en generadores maremotrices, que aprovechan la energía cinética de las mareas y corrientes marinas para generar energía. Al ser ésta muy fluctuante, los acumuladores sirven también de medio de control de la calidad energética y energía generada. La viabilidad de la implantación de estos sistemas en generadores maremotrices y parques eólicos *off shore* se estudia detalladamente en [23].

En la gran mayoría de los generadores de energía renovable la transmisión de la energía al volante de inercia se realiza mediante motores/generadores eléctricos. Por esta razón, es necesario incorporar controladores electrónicos programados para suavizar las tensiones originadas en el eje rotor al transmitirle cantidades de energía considerables.

- VI. Aeroespacial. Desde la década de 1970, la NASA ha conducido investigaciones para implantar volantes de inercia en sus satélites como medio de acumulación de energía. Los satélites poseen paneles solares que les suministran energía mientras orbitan bajo la influencia de la radiación solar. El problema surge cuando el satélite entra en la zona sombría de la órbita. Por ello necesitan un sistema de almacenamiento de energía para que puedan seguir funcionando durante dicho periodo de tiempo. Hasta el momento, los satélites integraban baterías de  $\text{NiH}_2$ , cuyo principal inconveniente es la necesidad de mantenimientos y sustituciones periódicas por su continua degradación. Los primeros ensayos con volantes de inercia fueron poco fructuosos debido a la rápida degradación de los cojinetes mecánicos que soportaban el giro del rotor. Pero con los recientes avances en los cojinetes magnéticos, los volantes de inercia han vuelto a considerarse como medio de almacenamiento de la energía captada por los paneles solares. Recientes estudios publicados en el *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences* [24] [25], plantean modelos de acumuladores cinéticos por volante de inercia en satélites de baja órbita (*LEO, Low Earth Orbit*), que tardan aproximadamente 90 minutos en completar la órbita terrestre, un tercio de los cuales se realizan en penumbra [26]. Los acumuladores mediante volantes de inercia eliminan la necesidad de las costosas misiones de mantenimiento y sustitución de las baterías ya que sufren muy poca o ninguna degradación y además, ocupan menos espacio que los bancos de baterías, permitiendo un aumento de la superficie de los paneles solares o simplemente un redimensionamiento de los otros componentes.
- VII. Otras aplicaciones. Las últimas investigaciones que se están llevando a cabo con tecnología superconductora muestran resultados muy favorables para su implementación en los sistemas de suspensión de los volantes de inercia, pero la desventaja continúa siendo la cantidad de energía que requieren los materiales superconductores para su funcionamiento. En la referencia [27] se plantea un diseño de volante inercial con tecnología superconductora que es capaz de compensar la energía requerida por el superconductor durante la fase de carga del volante aprovechando la capacidad de almacenamiento de energía térmica en forma de frío del nitrógeno sólido. Por tanto, el sistema no sólo es capaz de almacenar energía cinética en el volante de inercia sino que también almacena energía térmica en forma de frío. La desventajas de estos sistemas son los elevados costes del criogenizador y las altas cantidades de nitrógeno sólido que éste requiere.

Antiguamente, las atracciones de los parques temáticos utilizaban grandes volantes de inercia para el lanzamiento de los vagones de las montañas rusas. Con la evolución de los motores eléctricos los volantes de inercia quedaron obsoletos en éste ámbito, pero en los últimos años se han comenzado a combinar ambas tecnologías por las ventajas de los volantes de inercia en relación al control de la calidad energética de los motores eléctricos [28].



### 3.3 Descripción técnica de los sistemas conversores de energía cinética

#### 3.3.1 Funciones de los componentes del sistema

Como se ha descrito anteriormente, los sistemas conversores de energía cinética tienen como objetivo principal la traducción de energía cinética en otra forma de energía que pueda ser almacenada. Este estudio se va a limitar a aquellos que utilizan la energía cinética para transformarla en eléctrica a través de un generador eléctrico, y poder almacenarla en baterías.

El generador eléctrico de este tipo de acumuladores se puede interpretar erróneamente como un grupo electrógeno. La diferencia con los generadores reside en el origen del trabajo o fuerza que se aplica para su conversión en energía eléctrica. Un grupo electrógeno requiere que se aplique un trabajo mecánico cuya finalidad es puramente la de generar electricidad a partir de el mismo. Los generadores eléctricos de los sistemas conversores de energía cinética recuperan la energía aprovechando un aporte de trabajo cuya función es realizar una acción necesaria, que no es la de generar electricidad, como por ejemplo la de frenar o la de amortiguar en un vehículo.

##### 1. Motor/Generador eléctrico (M/G)

Es el componente más importante, encargado de realizar la conversión de energía cinética en energía eléctrica. Los motores/generadores eléctricos más comunes pueden ser rotativos o lineales. Lo más común es encontrarse máquinas rotativas en las cuales los componentes son cilíndricos y coaxiales. El conjunto está formado por:

- Un material magnético permanente o un electroimán. (a)
- Un bobinado formado por un número  $N$  de espiras de un material conductor, normalmente cobre esmaltado para evitar cortocircuitos en los contactos entre las diferentes vueltas. (b)
- Elementos de conexión como controladores, conmutadores, rectificadores, inversores y actuadores, dependiendo del tipo de motor/generador y del tipo de corriente generada: alterna o continua.

La generación de energía eléctrica se produce por inducción electromagnética siguiendo la ley de inducción de Faraday:

*La variación temporal del flujo de campo magnético que atraviesa una espira de material conductor, induce una corriente en dicha espira que se traduce en una fuerza electro-motriz o FEM inducida, denominada con la letra griega  $\mathcal{E}$ .*

La variación del flujo del campo magnético que atraviesa la espira o conjunto de ellas es la consecuencia del movimiento relativo entre el material magnético o electroimán y la(s) espira(s). Para cuantificar la magnitud de la fuerza electromotriz generada, es necesario definir previamente la expresión del flujo de campo magnético:



$$\phi_B = \iint \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad [Wb]$$

*Ecuación 16: Flujo de campo magnético a través de una superficie S.*

La fuerza electro-motriz inducida o FEM, depende de la variación temporal del flujo de campo magnético y del número de espiras que tenga la bobina inducida  $N$ , por tanto, queda expresada matemáticamente como:

$$\varepsilon = -N \cdot \frac{d\phi_B}{dt} \quad [V]$$

*Ecuación 17: Fuerza electro-motriz inducida*

La *FEM* generada se traduce en el voltaje generado en el circuito formado por las bobinas y sus terminales medido en Voltios, que normalmente están conectados a la batería o a un capacitor, aunque dependiendo del tipo de configuración del motor, existen ciertos elementos intermedios como se verá a continuación. El signo negativo se debe a que la fuerza electro-motriz generada se opone al cambio de flujo magnético. Al inducir una corriente en el estator, el rotor experimenta una resistencia a su movimiento de rotación, esta resistencia se denomina fuerza contra electro-motriz.

La configuración más común actualmente por su mayor eficiencia energética y vida útil es la de los motores/generadores rotativos con el bobinado en el estator, coaxial con los imanes permanentes o electroimanes en el rotor, que corresponde al denominado motor/generador *brushless* (Imagen 18).



*Imagen 18: Motor/generador brushless. Fuente: Google*

*Leyenda: a. Rotor; b. Estator*

En [29] se dispone más información sobre los últimos avances en motores/generadores aplicados a volantes de inercia.

## 2. Mecanismo fuente de energía cinética

El mecanismo o sistema encargado de entregar la energía cinética al motor/generador eléctrico tiene varias configuraciones posibles según la naturaleza del movimiento a transmitir.

Si el movimiento fuente de la energía cinética es de traslación, como por ejemplo el de la suspensión de un coche, es común redirigirlo a un movimiento de rotación de un eje mediante engranajes para hacer girar el rotor de un motor/generador, aunque también se han desarrollado prototipos con generadores lineales que aprovechan el movimiento relativo de traslación.

Por otro lado, el movimiento fuente de energía cinética también puede ser de rotación, como el del freno regenerativo de un coche, en el que el eje de giro de las ruedas conectado a un sistema de control de velocidad controlado electrónicamente, es el que comunica la rotación al rotor del motor/generador, pasando antes por el sistema de la transmisión y el diferencial. Más adelante se explican ejemplos de ambos tipos con mayor detalle.

### 3. Sistema de almacenamiento de la energía generada

Los motores/generadores de los sistemas conversores de energía cinética en energía eléctrica se conectan a baterías a las cuales dirigen dicha energía eléctrica. Es muy común encontrar conexiones de varias baterías en serie, en paralelo o en una combinación de ambos [30], según se quiera amplificar el voltaje, la intensidad de corriente o ambas, respectivamente.

En la mayoría de los casos, las conexiones entre motor/generador y baterías requieren de elementos intermedios (además del cable conductor de la electricidad) tales como:

- Elementos de control como interruptores, conmutadores o pulsadores.
- Elementos de protección, para proteger el circuito de corrientes elevadas o fugas. Estos elementos pueden ser fusibles, interruptores diferenciales o interruptores termomagnéticos.
- Rectificadores o inversores de corriente. El rectificador, es el dispositivo encargado de convertir corriente alterna (AC) en continua (DC), mientras el inversor convierte corriente continua en alterna. Ambos dispositivos pueden ser completamente electrónicos o pueden integrar elementos mecánicos. El uso de estos dispositivos depende del tipo de corriente que sale del generador y del tipo de carga que requieran las baterías.

Algunas variantes utilizan capacitores como método de almacenamiento en lugar de las baterías recargables.

#### 3.3.2 Aplicaciones de los sistemas conversores de energía cinética

Las aplicaciones de los conversores de energía cinética no son tan variadas como las de los acumuladores por volante de inercia, ya que sus objetivos se limitan a reutilizar o canalizar la energía cinética de una acción mecánica para producir electricidad en un generador eléctrico. El generador eléctrico, sobre todo los rotativos, hacen cierta función de acumulador cinético, pero su energía cinética es mucho más volátil que la de los volantes de inercia y el hecho de que también funcionen como motor impide en muchas ocasiones que su rotación se prolongue.

Por ello, estos sistemas no son acumuladores cinéticos propiamente dichos, ya que la función de acumular energía la realizan las baterías o capacitores, pero merecen ser incluidos en este estudio por el hecho de que su fuente de energía primaria es energía cinética. A continuación se muestran las aplicaciones más significativas de los sistemas conversores de energía cinética:

- I. Freno regenerativo. Como se ha citado anteriormente, existen muchas formas de freno regenerativo accionando un volante de inercia cuya transmisión de energía puede ser eléctrica o mecánica, sin embargo, algunos fabricantes están optando por conversores de energía cinética en lugar de volantes de inercia por su simplicidad, a pesar de ser menos eficientes en cuanto a la recuperación de la energía. Estos sistemas son adecuados en vehículos que tengan motores/generadores eléctricos en al menos uno de los dos ejes motrices, con sus respectivos mecanismos o controladores electrónicos que permitan invertir el funcionamiento de dichos motores/generadores para aumentar la eficiencia energética. El principio de funcionamiento es similar al de los sistemas con volante de inercia de transmisión eléctrica, solo que en lugar de transmitir la energía al volante de inercia, la comunican directamente al sistema de almacenamiento de energía eléctrica correspondiente.

Este tipo de freno regenerativo es apto para vehículos híbridos o completamente eléctricos. Su aplicación más frecuente se da en coches aunque también pueden encontrarse algunos modelos en bicicletas y motocicletas con rendimientos considerablemente menores.

En los vehículos híbridos o totalmente eléctricos, el freno regenerativo comienza a almacenar energía desde que el conductor deja de accionar el acelerador. En ese momento, la rotación de las ruedas se comunica al motor/generador haciéndolo girar en el sentido que le permite funcionar como generador. La energía generada se transfiere al sistema de almacenamiento eléctrico para su recarga.

Los fabricantes de vehículos híbridos y eléctricos utilizan distintas configuraciones en sus diseños, pero todos se basan en el mismo principio de funcionamiento. Un ejemplo de los frenos regenerativos más comunes son los fabricados por el mundialmente conocido fabricante *Toyota*, que disponen en sus modelos híbridos un motor/generador eléctrico, un generador eléctrico secundario, una unidad de distribución de la potencia, un sistema de almacenamiento en baterías y un motor de combustión interna. El motor/generador funciona como fuente de energía primaria hasta que se alcanza una velocidad determinada según las condiciones de conducción, momento en el que se activa el motor de combustión en combinación con el eléctrico en la manera más eficiente posible controlada por la unidad de distribución de potencia. El motor de combustión hace rotar el generador secundario para producir energía eléctrica simultáneamente. Cuando se suelta el acelerador o se presiona el pedal del freno, la unidad de distribución de potencia que es un sistema mecánico de engranajes planetarios asistido por control electrónico, transmite la inercia o energía cinética de las ruedas se comunica al motor/generador invirtiendo su sentido de giro para hacerlo funcionar como generador. [31] [32].

El innovador fabricante *Tesla*, utiliza el mismo concepto mediante otro tipo de configuración ya que sus vehículos son completamente eléctricos. Su modelo más popular, el *Model S*, consta de un motor/generador eléctrico de gran tamaño, un sistema de almacenamiento de la energía eléctrica constituido por cerca de 7000 pequeñas baterías de ión-litio, un inversor situado al lado del motor/generador en paralelo al eje trasero, y una simple caja de cambios que comprende una transmisión de una sola velocidad y un diferencial abierto. El motor/generador es de inducción y se alimenta de corriente alterna trifásica. La velocidad del rotor depende de la frecuencia de la corriente alterna, por tanto es muy fácil y rápido hacerla variar mediante el propio inversor. Éste último también controla la función que desempeña el motor/generador en cada instante de la marcha: si funciona como motor, la velocidad del rotor será menor que la velocidad del campo magnético en rotación. Para que funcione como generador, el inversor tiene que asegurar que la velocidad del rotor sea mayor que la del campo magnético rotativo. En este último caso, la fuerza contra electro-motriz es la que realiza la acción de frenado hasta que se requiera una fuerza de frenado mayor, en cuyo caso se activan los frenos convencionales. En la referencia [33] se muestra una patente de un sistema de freno regenerativo general para vehículos eléctricos.

Algunos coches totalmente eléctricos utilizan pequeños motores/generadores eléctricos en cada rueda, o al menos en dos de ellas. En estos casos, el principio de funcionamiento es el mismo que para el *Model S*. La diferencia reside en el tipo de motor/generador utilizado. En el caso de un M/G *brushless* de imanes permanentes, se debe cambiar el sentido de giro del rotor para cambiar el sentido de la corriente inducida en el estator. [34]

El sistema de freno regenerativo varía ligeramente en sus aplicaciones en motocicletas aunque, debido a su baja eficiencia, estas aplicaciones son difíciles de encontrar. En cualquier caso, la motocicleta eléctrica es una realidad que ya se puede encontrar en muchas ciudades, normalmente de la mano de empresas que ofrecen contratos de alquiler de corta duración como *eCooltra*. Por ello, no es extraño que cada vez se invierta más en investigación sobre la implementación del freno regenerativo en motocicletas eléctricas. Los estudios y diseños que se han planteado y desarrollado hasta el momento comparten el mismo principio de funcionamiento, al accionar el freno se aprovecha la rotación de las ruedas durante la frenada para hacer girar un M/G a modo de generador. En motocicletas, un sistema de control electrónico del ángulo de la manilla del freno es necesario para la combinación adecuada del freno regenerativo y el freno convencional. Existen algunos proyectos y diseños del sistema actualmente, tanto para *Scooters* [35], como para motocicletas convencionales [36]. Se debe remarcar el proyecto de unos estudiantes de la Escuela Politécnica Federal de Zurich (*ETH Zurich*), que han diseñado y desarrollado una motocicleta completamente eléctrica, con tracción a las dos ruedas, una autonomía de unos 400 kilómetros y un tiempo de carga completa de las baterías de alrededor de una hora. Pero a lo que a este estudio concierne, es el sistema de freno regenerativo que montan: los dos motores/generadores son capaces de regenerar energía, aumentando considerablemente la autonomía de la motocicleta. [37] ([enlace 12](#)).

Existen ya algunos fabricantes que integran frenos regenerativos en sus motocicletas, como la marca *Energy Motion* ([enlace 13](#)) o *Zero Motorcycles* ([enlace 14](#)). Estas últimas aseguran una recuperación de entre el 10% y el 15% de energía entre trayectos sin acelerar y trayectos de frenada. El artículo referenciado en [38] expone algunos datos técnicos del modelo *Zero S* del 2012, pero la empresa asegura que las últimas mejoras aumentan ligeramente la eficiencia del sistema de regeneración.

Por otro lado, es muy común encontrar aplicaciones del freno regenerativo en bicicletas por su simplicidad. Algunas, montan un estator bobinado concéntrico a la rueda fijo en el chasis, y un rotor de imanes permanentes también concéntrico y fijo a la rueda, de forma que se genere energía durante la marcha, a modo de dinamo. La energía recuperada se almacena en baterías y puede utilizarse bien como asistencia al pedalear o bien accionando un acelerador que hace funcionar al M/G como motor.

- II. Suspensión regenerativa. Como se ha podido observar anteriormente, una de las tendencias en el mercado energético centrado en el sector transportes es la conversión de la energía que se pierde en acciones mecánicas durante la marcha en energía útil. Gran parte de esta energía desaprovechada se pierde en la suspensión debido a irregularidades en el asfalto o camino y movimientos del chasis producidos por aceleraciones, deceleraciones o giros. Para intentar convertir esa energía perdida en energía útil, se comenzó a investigar desde los años 70 para desarrollar sistemas de suspensión que fueran capaces de realizar su función de amortiguación y a la vez, redirigir la energía cinética producto de las vibraciones y movimientos del chasis a un sistema de acumulación de energía. Desde entonces, la gran mayoría de los diseños que se han propuesto tratan de redirigir esa energía cinética a un generador eléctrico, para su almacenamiento en baterías o en potentes capacitores.

Los sistemas de suspensión actuales se componen de dos partes principales: un muelle de alta resistencia y un amortiguador hidráulico. Éste último se encarga de disipar la energía cinética de las vibraciones en calor al comprimirse y expandirse el fluido viscoso albergado en su interior, mientras que el muelle almacena y libera vibraciones y soporta el peso del vehículo.

Hoy en día existen varias configuraciones posibles para el diseño de un sistema de suspensión regenerativa. La más simple es la denominada suspensión regenerativa con generador lineal. En esta configuración, el amortiguador hidráulico se sustituye por un generador eléctrico lineal que consta de una parte móvil formada por un bobinado y una parte fija concéntrica, que puede moverse en dirección axial, formada por imanes permanentes anulares. Entre cada dos imanes permanentes se sitúa un anillo metálico de alta permeabilidad magnética, actuando como separador. Al ser sometido el sistema a vibraciones, se produce el movimiento relativo entre los imanes permanentes y el bobinado, dando lugar a energía eléctrica útil. La fuerza contra electro-motriz que se origina de la interacción entre el bobinado y los imanes permanentes sustituye a la fuerza de reacción del fluido comprimido en los amortiguadores hidráulicos. En la *Imagen 19* se expone un esquema del sistema.

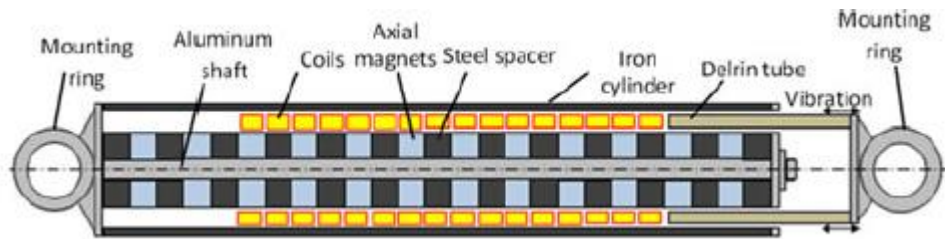


Imagen 19: Amortiguador regenerativo por generador lineal 1. Fuente: [39]

En la memoria referenciada en [39], se trata de mejorar el sistema. En uno de los diseños que se proponen, se introducen imanes de magnetización radial en lugar de los separadores metálicos como se puede apreciar en la Imagen 20. Con ello se aumenta la densidad de flujo magnético que pasa a través de las bobinas y por tanto, el valor de la potencia volumétrica generada es mayor.

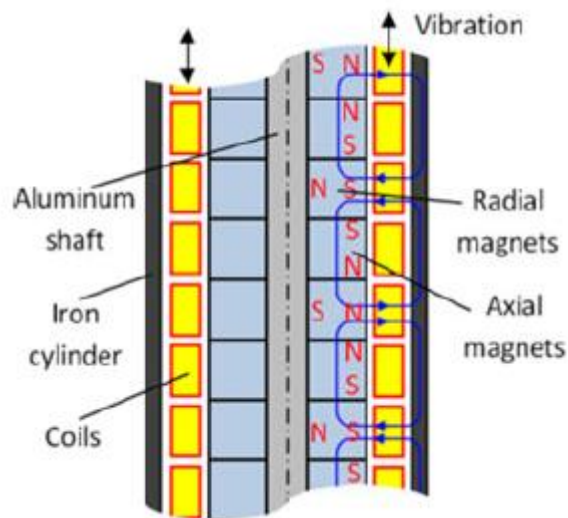


Imagen 20: Amortiguador regenerativo por generador lineal 2. Fuente: [39]

Al obtener mejores resultados con esta última configuración, los investigadores probaron a colocar dos columnas de imanes permanentes anulares en lugar de una, encerrando entre ellas al bobinado anular cilíndrico para aumentar la superficie atravesada por el flujo magnético (Imagen 21). El diseño resulta en una amplificación de la potencia volumétrica generada así como de la densidad de amortiguación, que mide la fuerza de resistencia por unidades de volumen y velocidad. También se diseñó un modelo con la misma distribución pero con separadores metálicos en lugar de los imanes de magnetización radial, dando lugar a menor potencia volumétrica generada, como era previsible.



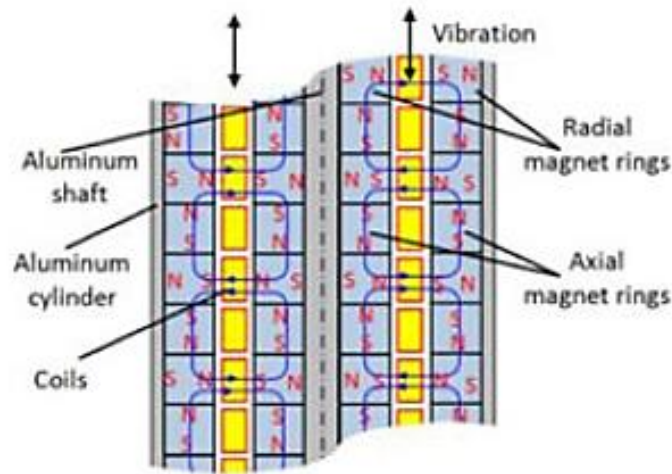


Imagen 21: Amortiguador regenerativo por generador lineal 3. Fuente: [39]

Los resultados obtenidos dependen de las dimensiones de los imanes y las bobinas, de la intensidad del flujo magnético, de la velocidad de la parte móvil y de la conductividad del conductor. Con el aumento de cualquiera de estos parámetros se observa un aumento de la potencia eléctrica generada. Aunque tanto la velocidad como las dimensiones están limitadas por varios factores, sí es planteable la implementación de superconductores para maximizar la conductividad, evitando pérdidas de energía en el conductor.

Las aplicaciones de generadores lineales en mecanismos de suspensión no se limitan sólo a vehículos. En el estudio [40] se diseña un generador lineal con imanes permanentes en su parte móvil y bobinas en su parte estática para aprovechar la energía cinética hidrodinámica de las mareas convirtiendo el movimiento en electricidad. El generador consta de una parte flotante, donde se acoplan los 960 potentes imanes de NdFeB, y una parte estática con 12 ranuras, cada una de ellas con 77 vueltas de bobinado. El oleaje ejerce fuerza sobre la parte flotante, que se ve obligada a moverse relativamente respecto a la parte estática, la cual tiene en su parte inferior una placa adherida a ella para mantenerla estática con respecto a la parte móvil. El mecanismo está diseñado con el objetivo de conseguir 1 kW de energía eléctrica generada conforme a un valor medio de las condiciones de oleaje de la costa de *Newport, Oregon, Estados Unidos*, donde se registran olas de en torno a 1.5 m de altura. En la *Imagen 22* se puede apreciar un esquema del diseño.

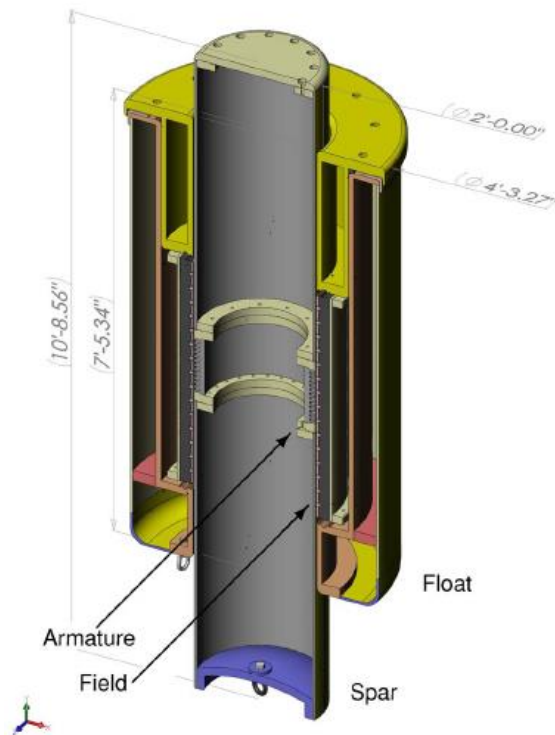


Imagen 22: Generador lineal conversor de energía cinética hidrodinámica. Fuente: [40]

Existe otra variante en cuanto al diseño de suspensión regenerativa que consiste en la conversión del movimiento de traslación a rotación, que servirá para hacer girar un generador para producir energía eléctrica. Una vez más, la fuerza contra electro-motriz que experimenta el rotor del generador es la encargada de realizar la función de amortiguación. A su vez, existen principalmente tres métodos para transformar la traslación en rotación en éste ámbito: mediante husillo de bolas recirculantes o husillo de rodillos planetarios, mediante un sistema hidráulico y mediante un sistema piñón-cremallera.

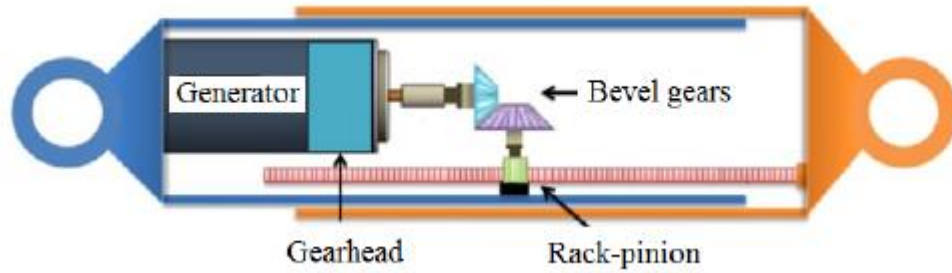
El husillo de bolas recirculantes utiliza rodamientos de bolas en un circuito cerrado para hacer girar el tornillo. Es una forma de reducir considerablemente el rozamiento al hacer la conversión de traslación a rotación en mecanismos de fricción. El husillo de rodillos planetarios utiliza varios engranajes en forma de rodillo cilíndrico que interactúan entre sí y con el tornillo principal alrededor de su perímetro, haciendo mucho más directa la transición traslación-rotación. El problema de estos dos métodos es su baja eficiencia cuando trabajan bajo altas frecuencias de vibración.

Los sistemas de transmisión hidráulicos utilizan el fluido comprimido por el pistón del amortiguador para hacer rotar el eje del generador eléctrico. Este método es muy poco frecuente por sus exigentes requisitos técnicos y su baja eficiencia por las múltiples pérdidas en el circuito hidráulico.

El sistema piñón-cremallera es el más simple y hasta el momento, el más efectivo de los métodos de transición traslación-rotación en las suspensiones regenerativas. La cremallera es un prisma regular dentado por una de sus caras

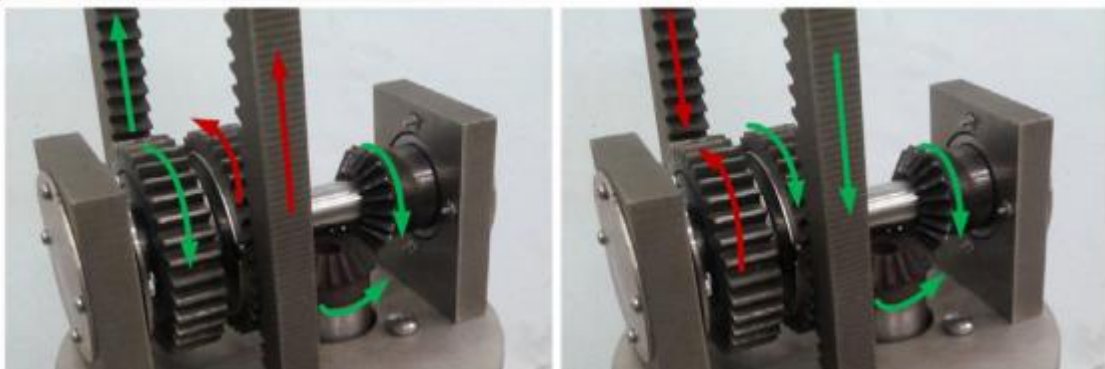


ensamblado a la parte móvil. El piñón engrana con la cremallera rotando cuando ésta realiza un movimiento de traslación. La rotación del piñón se redirige al rotor del generador eléctrico.



*Imagen 23: Amortiguador regenerativo por generador rotativo con piñón-cremallera. Fuente: [41]*

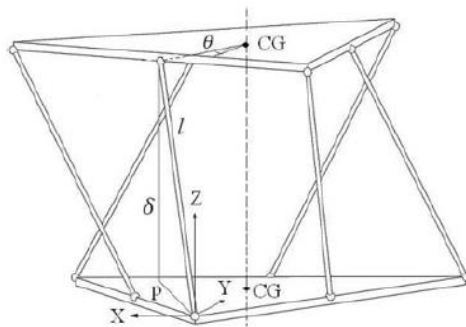
El sistema mostrado en la *Imagen 19* es una simplificación del sistema real. En el estudio realizado en [41], se describe el funcionamiento de una aplicación real de este diseño: se utilizan dos cremalleras con sus respectivos piñones engranados, cada uno de los cuales tiene un embrague anti-retorno. Las cremalleras están enfrentadas entre sí, por lo que los piñones giran en sentidos opuestos. Cuando las cremalleras experimentan un movimiento de traslación de compresión y expansión del amortiguador, uno de los embragues es accionado para comunicar la rotación al rotor durante la fase de compresión, y el embrague del piñón que gira en sentido opuesto es accionado durante la expansión. De esta forma, se asegura que se comunique la rotación de los piñones al eje del rotor en un solo sentido, para que la máquina eléctrica funcione siempre como generador, aprovechando todo el movimiento de traslación. En la *Imagen 24* se puede observar el funcionamiento durante el movimiento de la fase de compresión (izquierda) y de expansión (derecha).



*Imagen 24: Funcionamiento de la transmisión piñón-cremallera del amortiguador regenerativo por generador rotativo. Fuente: [41]*

En la imagen, las flechas verdes indican los movimientos que se están transmitiendo al eje rotor del generador, y las rojas, los que no se están transmitiendo.

En otra línea de diseño se sitúa el sistema de suspensión regenerativa por el mecanismo descrito en [42]. Se trata de un conjunto mecánico que transforma el movimiento de traslación en rotación sin la necesidad de engranajes de transmisión, tan sólo un engranaje planetario para asegurar que la rotación sea unidireccional. El mecanismo, ilustrado en la *Imagen 25*, consta de dos placas traingulares, desfasadas  $90^\circ$  entre sí y unidas por brazos mediante rodamientos de bola en los puntos de anclaje, de forma que los vértices de una de las placas están unidos con los puntos medios de las aristas de la placa opuesta y viceversa. Al aplicar una fuerza en dirección perpendicular a una de las placas, los brazos obligan a rotar a la placa opuesta, que rotan a su vez el eje del generador rotativo pasando por el sistema de engranajes planetario.



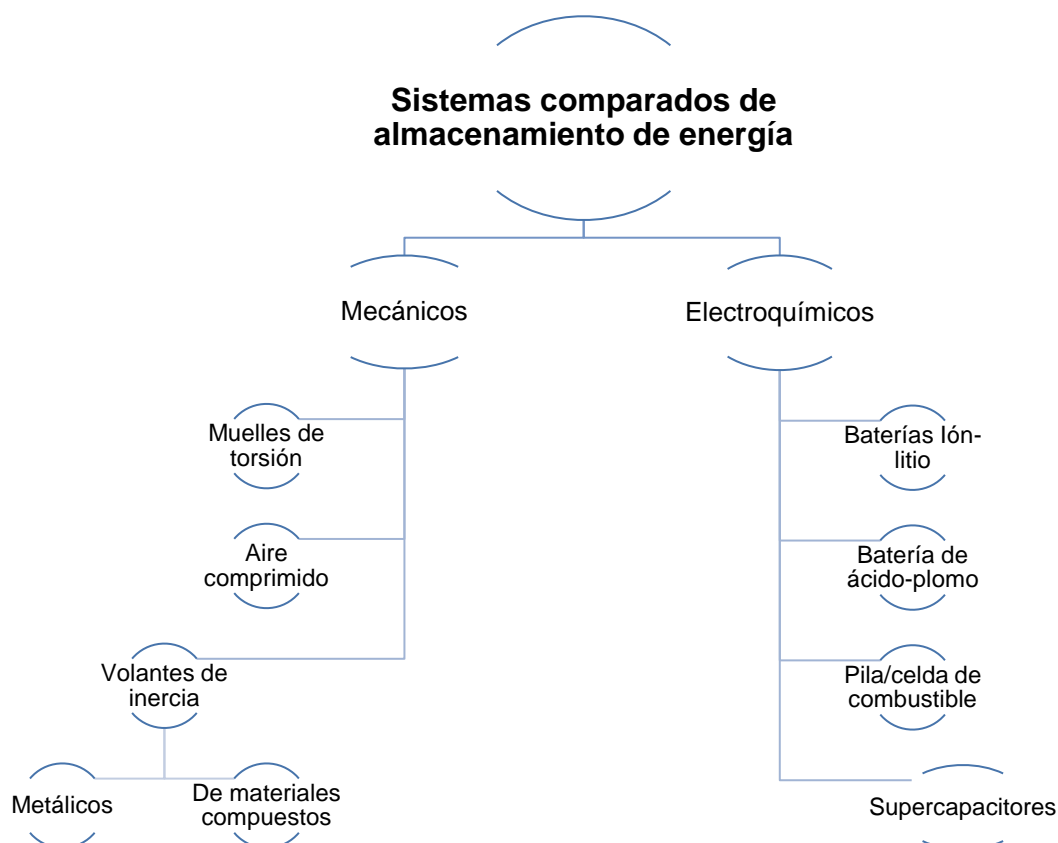
*Imagen 25: Mecanismo conversor de traslación-rotación alternativo para suspensión regenerativa por generador rotativo. Fuente: [42]*

Las placas pueden alcanzar un valor máximo de ángulo de rotación relativo de  $105^\circ$  para evitar la colisión entre los brazos, que equivalen a 3 centímetros de movimiento traslacional. En el experimento llevado a cabo en el estudio, el mecanismo se combina con dos combinaciones paralelas de dos resortes en serie cada una, colocadas a ambos lados para simular la acción mecánica de los muelles del sistema de suspensión convencional y se plantea el método matemático para el cálculo de la energía eléctrica obtenida según los parámetros utilizados en el diseño del mecanismo, incluyendo un controlador que permite variar la resistencia a la vibración ofrecida por el sistema de suspensión. El sistema de engranajes planetario junto con la fuerza contra electro-motriz del generador y la resistencia a la vibración del mecanismo regulada por el controlador dan lugar a la fuerza de resistencia equivalente a la de un amortiguador convencional. El diseño representa una buena alternativa a los sistemas de suspensión regenerativa por generador rotativo con transmisión tipo piñón-cremallera, eliminando la necesidad de utilizar engranajes cónicos para el cambio direccional de la rotación, que producen pérdidas mecánicas considerables.

## 4 ANALISIS COMPARATIVO DE LA TECNOLOGÍA ACTUAL

Una vez revisados y discutidos los distintos tipos de acumuladores cinéticos y sus características, se procede a realizar un análisis comparativo entre los distintos tipos de acumuladores y otros tipos de sistemas de almacenamiento de energía con los que compiten en el mercado actual.

Los tipos seleccionados de almacenamiento de energía para la comparativa vienen reflejados en el siguiente esquema:



### 4.1 Comparativa global cualitativa

Ante el gran abanico de posibilidades que existen actualmente en cuanto a la elección de los criterios para un análisis cualitativo de estos tipos de tecnología, se ha decidido simplificar el análisis en ventajas y desventajas de los diferentes sistemas, para poder englobar la mayor cantidad de información posible. En la *Tabla 3* mostrada a continuación se reflejan dicho análisis.

			VENTAJAS	DESVENTAJAS
MECÁNICOS	Aire comprimido		Bajo coste de operación Bajo impacto ambiental Bajo índice de pérdidas de energía Larga vida útil	Alta inversión inicial Baja duración de la energía almacenada Amortización lenta Alta dependencia de la temperatura
	Volantes de inercia	Metálicos	Alto momento de inercia Bajo coste y mantenimiento Versatilidad en combinación con sistemas eléctricos y mecánicos Variedad de aplicaciones Bajo impacto ambiental	Peso elevado Velocidad y torque limitados por las tensiones críticas Poco eficientes Necesitan fuertes medidas de seguridad Coste elevado de componentes auxiliares que mejoran su rendimiento
		De materiales compuestos	Altas velocidades de giro y límites de tensión Vida útil muy larga, bajo mantenimiento requerido Versatilidad en combinación con sistemas eléctricos y mecánicos Densidad de energía y energía específica elevadas Gran variedad de aplicaciones presentes y buena proyección de futuro Impacto ambiental nulo	Coste de fabricación elevado Bajo momento de inercia Alta dificultad de diseño Necesitan fuertes medidas de seguridad Coste elevado de componentes auxiliares que mejoran su rendimiento
	Muelles de torsión		Alta vida útil y fiabilidad Bajo coste de mantenimiento Versatilidad frente a su combinación con sistemas eléctricos y mecánicos No necesita electrónica Bajo impacto ambiental	Aplicaciones limitadas Gran tamaño relativo Falta de resultados experimentales Capacidad de almacenamiento limitada por el ángulo de torsión
TERMO-QUÍMICOS	Baterías lón-litio		Muy alta eficiencia Alta densidad de energía Larga vida útil	Alto coste debido a las medidas de seguridad anti-sobrecarga Gran impacto ambiental en caso de no reciclaje Disminución considerable del rendimiento en caso de degradación Sensible a altas temperaturas
	Baterías de ácido-plomo		Baja inversión inicial Puede suministrar altas intensidades de corriente Alta densidad de energía para aplicaciones estacionarias Alta seguridad ante sobrecargas	Requieren refrigeración Vida útil limitada Alta toxicidad de sus componentes Las operaciones de carga y descarga son diferentes
	Pila/celda de combustible		No contaminantes, fiables y silenciosas No degradables y recargables Su eficiencia no depende de su tamaño Gran proyección de futuro	Poco desarrolladas Coste elevado Baja densidad de energía relativa Almacenamiento a corto plazo
	Supercapacitores		Alta eficiencia Alta capacidad energética Larga vida útil	Baja densidad de energía Coste de instalación alto Sólo permiten almacenamiento a corto plazo

Tabla 3: Comparación cualitativa de los principales sistemas de acumulación de energía. Fuentes: [30], [43] – [48]

## 4.2 Comparativa global cuantitativa

Descritas ya las cualidades de los principales tipos de sistemas de almacenamiento energético, se procede a la recopilación y documentación de los valores cuantitativos para el conjunto de parámetros que sirven para caracterizarlos en la *Tabla 4*.

			POTENCIA [MW]	CAPACIDAD [MWh]	DENSIDAD DE ENERGÍA [kWh/m <sup>3</sup> ]	ENERGÍA ESPECÍFICA [kWh/T]	TIEMPO DE ALMACENAMIENTO	EFICIENCIA [%]	VIDA ÚTIL [nº de ciclos]	COSTE POR kW [USD/kW]	COSTE ENERGÉTICO [USD/kWh]
MECÁNICOS	Aire comprimido		5 - 400	Máx. 250	2 - 6 (70 - 200 mbar)	30 - 60	Días	60 - 80	8000 - 12000	400 - 800	2 - 50
	Volantes de inercia	Metálicos	0.01 - 0.25	0.001 - 0.01	15 - 20	11 - 15	Segundos - minutos	90	>100000	250 - 350	1000 - 5000
		De materiales compuestos	0.07 - 0.7	0.0013 - 0.014	20 - 80	10 - 30	Segundo - minutos	95	>175000	400 - 600	20000 - 100000
TERMO- QUÍMICOS	Baterías lón-litio		0.001 - 0.1	0.25 - 25	300	75 - 200	Días - meses	85 - 100	1000 - 4500	175 - 4000	500 - 2500
	Baterías de ácido-plomo		0.1 - 40	0.25 - 50	70	20	Días - meses	70 - 90	500 - 2000	300 - 600	200 - 400
	Pila/celda de combustible		0.3 - 50	variable	500 - 3000	0.6 - 1.2	Horas - meses	20 - 85	> 1000	200 - 1500	6 - 1000
	Supercapacitores		0.1 - 1	variable	10 - 30	2.5 - 15	Segundos - horas	95	25000	100 - 300	300 - 2000

Tabla 4: Comparación cuantitativa de algunos de los principales sistemas de acumulación de energía actuales. Fuentes: [30], [43] - [48]

Los datos numéricos reflejados en la tabla anterior son orientativos, ya que dependen de una gran variedad de factores, entre ellos, el proceso de fabricación de cada fabricante, las diferencias entre los componentes que forman cada tipo de sistema de almacenamiento y las condiciones de operación de cada uno de ellos. En este último análisis cuantitativo se han suprimido los muelles de torsión ante la falta de datos numéricos fiables. En cualquier caso, quedan revisadas las características de los sistemas que hoy en día son competencia directa de los acumuladores cinéticos con el fin de informar a futuros lectores sobre el estado del arte del panorama tecnológico actual.

## 5 TENDENCIAS Y FUTURO DE LOS ACUMULADORES

Las líneas de investigación actuales se centran fundamentalmente en aumentar la capacidad energética y la densidad de energía de los acumuladores cinéticos. Como en cualquier sector tecnológico, se busca también reducir los costes y la dificultad de fabricación de los sistemas, haciéndolos a su vez más ligeros y sencillos.

Tanto para la fabricación de acumuladores mecánicos como de sistemas conversores de energía cinética, el estudio y la adaptación de los superconductores supone un gran avance de la tecnología que permite alcanzar valores de eficiencia hasta el momento inalcanzables. Sus exigentes condiciones de operación son el único obstáculo que presentan, pero la comunidad científica asegura que estamos cerca de poder adaptar esta tecnología sin que tengamos que invertir tanta energía en su condicionamiento.

Los acumuladores por volantes de inercia son cada día más eficientes y ligeros gracias al trabajo de los investigadores en materias como los materiales compuestos, la tecnología de suspensión magnética o la combinación con otros volantes de inercia o con otros sistemas de generación y almacenamiento de energía. Cada día se apuesta más por esta tecnología debido a las crecientes restricciones ambientales que se están imponiendo para paliar el uso de fuentes de energía perjudiciales.

El éxito de los volantes de inercia ha fomentado la investigación de otros sistemas mecánicos o electro-mecánicos de acumulación de energía y ha demostrado que almacenar energía en su forma cinética puede ayudar a reducir la dependencia que la sociedad actual tiene a las baterías. Aún queda un largo camino para conseguir que los acumuladores cinéticos puedan sustituirlas, pero la tendencia actual muestra una evolución rápida de la tecnología.

Parte del éxito que tienen los vehículos eléctricos hoy en día se debe a los sistemas conversores de energía que integran. Ante las limitaciones que suponen las baterías pequeñas en sistemas que manejan grandes cantidades de energía, es imprescindible que se acompañen con sistemas de recuperación de energía, que gracias a algunos investigadores siguen evolucionando hacia sistemas cada vez con menos pérdidas. Para ello, es de vital importancia que se sigan mejorando los sistemas de transmisión de la energía, tanto mecánicos como eléctricos.

## 6 CONCLUSIONES

Los acumuladores cinéticos se han establecido en el mercado energético como una opción viable y eficiente para la recuperación y conservación de la energía. Su evolución en los últimos años ha sido rápida debido a la necesidad de la implantación de nuevas formas de energía no contaminantes, por su bajo coste y por la simplicidad de su diseño. Además, han demostrado ser compatibles con una gran variedad de formas de generación de energía. La combinación de generadores de energía renovable con acumuladores cinéticos supone la obtención de energía completamente libre de contaminantes, hecho que nos ayuda a acercarnos a un futuro más sostenible y energéticamente eficiente.

El presente estudio pone a disposición del lector una recopilación y estructuración de la información generalizada sobre los acumuladores cinéticos, así como del ámbito tecnológico que les rodea. Con ello, a parte de la función de informar al lector o investigador, se pretende enfatizar en los beneficios ambientales y económicos que supone la implantación de esta tecnología.

## 7 PRESUPUESTO

Autor: José Ignacio Fontán Álvarez-Garcillán

Departamento: Ingeniería mecánica

Título del proyecto: Estado del arte de los acumuladores cinéticos de energía.

Descripción del proyecto: Estudio de las técnicas pasadas, presentes y futuras de acumulación de energía por medio de acumuladores cinéticos y otros sistemas relacionados.

### Análisis presupuestario

#### I. Concepto de personal

Trabajador	Categoría en la empresa	Coste horario por categoría [€ / h]	Horas del proyecto	Coste total
José I. Fontán Álvarez- Garcillán	<b>A-Ingeniero Becario</b>	<b>6</b>	400	2400.00 €
	B-Ingeniero Junior	9		
	B1-Ingeniero Junior >2 años.	12.5		
	C-Ingeniero Sénior>10 años	16		
	C1-Ingeniero Sénior>20 años	20		

## II. Concepto de equipos

Equipo	Coste mensual [€ / mes]	Meses de uso	Coste total
Ordenador Personal	30 <sup>1</sup>	3.125 <sup>2</sup>	93.75 €

<sup>1</sup> Se han considerado 24 meses para la amortización del equipo.

<sup>2</sup> Se han considerado 40 horas semanales de jornada laboral

## III. Concepto de software

Software	Coste mensual [€ / mes]	Meses de uso	Coste total
<i>Microsoft Office 365</i>	23.25 <sup>3</sup>	3.125	72.65 €

<sup>3</sup> Se han considerado 12 meses de amortización del software

## IV. Coste total

Concepto	Coste
Personal	2400 €
Equipos	93.75 €
Software	72.65 €
<b>Total</b>	<b>2566.40 €</b>



## 8 REFERENCIAS

- [1] Bender, D. (2016). Chapter 10 - Flywheels. In *Storing Energy* (pp. 183-201).
- [2] Stodola, A., & Loewenstein, Louis Centennial. (1905). *Steam turbines: With an appendix on gas turbines and the future of head engines*. D. Van Nostrand.
- [3] Bitterly, J. (1998). Flywheel technology: Past, present, and 21st century projections. *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, 13(8), 13-16.
- [4] Griethuysen, A. (1988). *New applications of materials*. Luxembourg: OPOCE.
- [5] Östergård, R. (2011). *Flywheel energy storage: A conceptual study*.
- [6] Amiryar, M., & Pullen, K. (2017). A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. *Applied Sciences-Basel*, 7(3).
- [7] Patente nº US 8708081 B1: Continuously variable transmission coupled flywheel for energy recycling and cyclic load systems. Kevin Williams, 2014.
- [8] Genta G.; *Kinetics Energy Storage: Theory and Practice of Advanced Flywheel Systems*; London: Butterworths & Co., Ltd 1985.
- [9] Patente nº ES 2096094 (traducción): Volante de almacenado de energía con cojinetes magnéticos superconductores. Weinberger, Bernard R., Lynds, Lahmer, Jr., Hull, John R., 1997.
- [10] Patente nº US 7053589 B2: Long-life vacuum system for energy storage flywheels. Christopher W. Gabrys, David R. Campbell, 2006.
- [11] Ashley, S. (1996). Designing safer flywheels. *Mechanical Engineering*, 118(11), 88-91.
- [12] Long Zhou, & Zhiping Qi. (2009). Modeling and simulation of flywheel energy storage system with IPMSM for voltage sags in distributed power network. *Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on*, 5046-5051.
- [13] Castro, F.; Ng, L.S.B.; Dombek, A.; Solis, O.; Turner, D.; Bukhin, L.; Thompson, G. La Metro Red Line Wayside Energy Storage Substation Revenue Service Regenerative Energy Saving Results. In *Proceedings of 2014 Joint Rail Conference (JRC 2014)*, Colorado Springs, CO, USA, 2-4 April 2014; pp. 1-5.
- [14] Dhand, A., & Pullen, K. (2013). Review of flywheel based internal combustion engine hybrid vehicles. *International Journal of Automotive Technology*, 14(5), 797-804.
- [15] Dhand, A., & Pullen, K. (2015). Review of battery electric vehicle propulsion systems incorporating flywheel energy storage. *International Journal of Automotive Technology*, 16(3), 487-500.
- [16] Śliwiński, C. (2016). Kinetic energy recovery systems in motor vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 148(1).

- [17] Patente n°: CN 201914085: City bus driven by flywheel batteries. Xiao Yaojun, & Wang Zhaoxin, 2011.
- [18] Anonymous. (2014). GKN Hybrid Power to supply transit bus flywheels. *Composites Technology*, 20(5), 9.
- [19] Wang, Liang, Chapelsky, Koval, & Knight. (2009). Application of flywheel system in series hybrid transit bus. *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2009. VPPC '09. IEEE, 1529-1534.
- [20] Application of Flywheel System in Series Hybrid Transit Bus. Chen Yuqi, & Fu Hailong, 2009.
- [21] Hearn, C., Flynn, M., Lewis, R., Thompson, B., Murphy, & Longoria. (2007). Low cost flywheel energy storage for a fuel cell powered transit bus. *VPPC 2007 - Proceedings of the 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 829-836.
- [22] Xie, C., & Zhang, C. (2010). Research on the Ship Electric Propulsion System Network Power Quality with Flywheel Energy Storage. *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2010 Asia-Pacific, 1-3.
- [23] Wang, L., Yu, J., & Chen, Y. (2011). Dynamic stability improvement of an integrated offshore wind and marine-current farm using a flywheel energy-storage system. *IET Renewable Power Generation*, 5(5), 387-396.
- [24] Çelikel, R., Özdemir, M., & Aydoğmuş, &. (2017). Implementation of a flywheel energy storage system for space applications. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 25(2), 1197-1210.
- [25] Aydin, K., & Aydemir, M. (2016). Sizing design and implementation of a flywheel energy storage system for space applications. *Turkish Journal Of Electrical Engineering And Computer Sciences*, 24(3), 793-U2756.
- [26] B. Abdi, A. Alimardani, R. Ghasemi and S. Mirtalaei. Energy Storage Selection for LEO Satellites, *International Journal of Machine Learning and Computing*, pp. 287-290, 2013.
- [27] Jisung Lee, Sangkwon Jeong, Young Hee Han, & Byung Jun Park. (2011). Concept of Cold Energy Storage for Superconducting Flywheel Energy Storage System. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, 21(3), 2221-2224.
- [28] Balikci, A., Zabar, Z., & Birenbaum, L. (2009). Improved Energy Utilization of Linear Induction Launchers by Considering Each Section as an Individual Sub-Launcher. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 45(1), 241-243.
- [29] Yu, Y. Wang, Y.; Sun, F. The Latest Development of the Motor/Generator for the Flywheel Energy Storage System. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC)*, Jilin, China, 19–22 August 2011; pp. 1228 1232.
- [30] Letcher, T. M. (2008). Chapter 15: Fuel cells and batteries. *Future Energy*. Elsevier.
- [31] Toyota Motor Engineering & Manufacturing North America, Inc. (2015). *Diversification of energy from regenerative braking*.

- [32] Patente nº: US 20130076113 A1: Regenerative braking system for a hybrid electric vehicle and a corresponding method. Plug-In Hybrid Vehicle Partnership Handelsbolag, 2016.
- [33] Patente nº: US 2013/0162009 A1: Electric vehicle regenerative braking system. Kurt Mitts, Ali Maleki, Canton, Broc William, Ten Houten, 2013.
- [34] Patente nº: CN 102616145: Regenerative braking energy storage device for electric automobile. LI Tingyong, & Xu Changqin, 2012.
- [35] Patente nº: US 6724165 B2: Regenerative braking system for an electric vehicle. Peter S. Hughes, 2004.
- [36] Celin Abad Padilla, Javier Villagrán Cáceres, Edison Chiriboga Cárdenas, Carlos Velasco Moyano. (2017). Diseño e implementación de un sistema de freno regenerativo y transmisión eléctrica en una motocicleta convencional.
- [37] Jorge Sanz Fernández, Cest. (2018). EtheC, la futurista motocicleta eléctrica con 400km de autonomía. Cinco Dias, p. Cinco Dias, Jun 13, 2018.
- [38] Marc Cook, 2012. Artículo para *Cycle World*: Amping up battery capacity gives the 2012 Zero a fresh charge.
- [39] Tang, X., Lin, T., & Zuo, L. (2013). Design and Optimization of a Tubular Linear Electromagnetic Vibration Energy Harvester. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(2), 615-622.
- [40] Prudell, J., Stoddard, M., Amon, E., Brekken, T., & Von Jouanne, A. (2010). A Permanent-Magnet Tubular Linear Generator for Ocean Wave Energy Conversion. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 46(6), 2392-2400.
- [41] Jiang, Xz, Wang, J, Li, Yc, & Li, Jc. (2014). Design and modelling of a novel linear electromagnetic vibration energy harvester. *International Journal Of Applied Electromagnetics And Mechanics*, 46(1), 165-183.
- [42] Sabzehgar, R., Maravandi, A., & Moallem, M. (2014). Energy Regenerative Suspension Using an Algebraic Screw Linkage Mechanism. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 19(4), 1251-1259.
- [43] Dekka, Ghaffari, Venkatesh, & Bin Wu. (2015). A survey on energy storage technologies in power systems. *Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, 2015 IEEE, 105-111.
- [44] Zakeri, & Syri. (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42(C), 569-596.
- [45] D. Rastler (EPRI Project Manager), *Electricity energy storage technology options*, 2010.
- [46] Schoenung, S., & United States. Department Of Energy. (2011). *Energy storage systems cost update : A study for the DOE Energy Storage Systems Program*.
- [47] Ibrahim, Ilinca, & Perron. (2008). Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(5), 1221-1250.

- [48] Chen, Cong, Yang, Tan, Li, & Ding. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3), 291-312.